



Krzysztof KWAŚNIEWSKI*, Michał KOPACZ**,
Paweł GRZESIAK***, Radosław KAPŁAN***

Ekonomiczna ocena technologii zgazowania węgla z wykorzystaniem analizy opcji rzeczowych – przeгляд stosowanych podejść

Streszczenie: Instalacje zgazowania węgla są elastycznymi technologiami, które pozwalają na przetwarzanie w procesach chemicznych i energetycznych różnych paliw wejściowych i wytwarzanie wielu produktów finalnych. Posiadają też możliwość dobudowania modułu do wychwytu i składowania CO₂ (*Carbon Capture and Storage, CCS*).

Metodą, która umożliwi wycenę tego rodzaju elastyczności decyzyjnej, rozumianej jako możliwości modyfikowania wcześniej podjętych decyzji menedżerskich jest analiza opcji rzeczowych (*Real Options Analysis, ROA*). Polega ona na sformułowaniu możliwości działań operacyjnych w postaci opcji, jakie mogą, ale nie muszą, zostać zrealizowane w ramach rozważanego przedsięwzięcia. Dysponowanie takimi opcjami oznacza zatem możliwość podjęcia określonego działania w przyszłości i czerpania z niego dodatkowego pożytku.

Dotychczasowe publikacje z obszaru oceny efektywności ekonomicznej z zastosowaniem podejścia opcyjnego dotyczyły możliwości produkcji energii elektrycznej w procesach naziemnego zgazowania węgla celem produkcji własnego gazu. W kategoriach opcji przedstawiany jest również problem modyfikacji technologii polegający na możliwości późniejszej rozbudowy instalacji w kierunku wychwytywania i magazynowania CO₂. Do modelowania zmienności cen energii elektrycznej, praw do emisji CO₂, cen węgla, czy też cen gazu ziemnego wykorzystywane są procesy stochastyczne. Zagadnienia modelowania opcji rozwiązywane są najczęściej z wykorzystaniem drzew dwumianowych.

Słowa kluczowe: zgazowanie węgla, analiza opcji rzeczowych, elastyczność decyzyjna, model wyceny, wartość strategiczna (XNPV)

* Dr inż., *** Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Zarządzania, Katedra Zarządzania w Energetyce, Kraków.

** Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Zakład Badań i Rynku Surowcowego i Energetycznego, Kraków: e-mail: kopacz@min-pan.krakow.pl.

Economic assessment of coal gasification technologies using real option analysis – review of applied approaches

Abstract: Coal gasification installations are flexible technologies that have the possibility during the operational period to transform a variety of input fuels, to produce many final products and to install the module for carbon capture and storage (CCS).

A technique that allows valuation of such managerial flexibility – understood as the possibility of changing previously taken decisions – is the real options analysis (ROA). The method is based on the formulation of operational capabilities in the form of options, which may – but need not be executed within the analyzed project. Through the disposal of such options it is therefore possible to take specific actions in the future and get additional benefits from them.

Publications in the area of the economic evaluation of coal gasification technologies using the option approach were mainly related to the combined cycle plant (CC) for the production of electricity, which assumed the possibility of building coal gasification installation to produce gas. In terms of the options, another problem is presented involving technology modification, for example, the possibility of later development of the installation in the direction of the carbon capture and storage (CCS). For modeling the volatility of electricity prices, CO₂ emission allowances, coal prices, natural gas prices, stochastic processes are used. Problems of option modeling are usually solved using binomial trees.

Keywords: coal gasification, real options analysis, managerial flexibility, valuation model, the strategic value (XNPV)

Wprowadzenie

Instalacje wykorzystujące proces zgazowania to elastyczne technologie, które nie tylko umożliwiają przetwarzanie różnych paliw wejściowych (węgiel kamienny, węgiel brunatny, torf, biomasa, koks naftowy, pozostałości rafineryjne), ale pozwalają również na wytwarzanie szerokiego wachlarza produktów końcowych (energia elektryczna, wodór, metanol i jego pochodne, paliwa płynne). Dodatkowo, dzięki rozbudowanej kombinacji procesów oczyszczania powstałego w trakcie zgazowania syngazu, pozwalają na stosunkowo proste zainstalowanie w zależności od potrzeb lub wymagań środowiskowych modułu do wychwytu i składowania CO₂ (*Carbon Capture and Storage*, CCS). Biorąc pod uwagę ciągle zmiany poziomów cen i kosztów, możliwość modyfikowania instalacji w fazie operacyjnej może być istotnym źródłem wartości rynkowej, która powinna zostać uwzględniona w procesie oceny efektywności ekonomicznej.

Metodą, która pozwala na wycenę możliwości zmiany wcześniej podjętych decyzji menedżerskich, jest analiza opcji rzeczowych (*Real Options Analysis*, ROA), nazywana również rachunkiem opcji rzeczowych (*Real Option Valuation*, ROV). Rozważana technika, oprócz możliwości uwzględnienia w ocenie ekonomicznej elastyczności operacyjnej, pozwala również na określenie optymalnego momentu podjęcia określonej decyzji inwestycyjnej (np. o budowie instalacji bądź jej wcześniejszego wyłączenia). W zależności od specyfiki przedsięwzięcia oraz doświadczenia i wiedzy technologicznej menedżerów, identyfikuje się możliwości działań operacyjnych w postaci opcji, które mogą (ale nie muszą) zostać wykonane w ramach rozpatrywanego projektu. Dysponowanie takimi opcjami oznacza zatem możliwość podjęcia w przyszłości określonej operacji na posiadanych aktywach i zwiększenia w ten sposób produktywności prowadzonej działalności.

Wymienione zalety analizy opcji rzeczowych oraz fakt, że technologie zgazowania węgla są przedsięwzięciami charakteryzującymi się dużym zakresem elastyczności decyzyjnej rozu-

mianej jako możliwość aktywnego reagowania menedżerów na zmieniające się warunki gospodarowania, stanowią przyczynek wzrostu zainteresowania podejściem opcyjnym w ekonomicznej ocenie projektów inwestycyjnych bazujących na procesie zgazowania węgla.

1. Zgazowanie węgla – krótka charakterystyka

Węgiel jest najszerzej występującym na ziemi paliwem kopalnym. Jednocześnie od momentu odkrycia węgiel był wykorzystywany do celów energetycznych i chemicznych. Sytuacja ta uległa zmianie wraz z odkryciem możliwości przetwarzania i wykorzystywania ropy naftowej oraz gazu ziemnego. Skutkowało to zmniejszeniem popularności tradycyjnego – poprzez spalanie – wykorzystywania węgla. Sytuacja ta stała się przyczyną szerokich badań nad metodami jego przetworzenia do paliw płynnych i gazowych. Doprowadziły one do powstania wielu nowych technologii węglowych bazujących na takich procesach jak odgazowanie, zgazowanie, czy też uwodornienie (Karcz i Ściążko 2006).

Zgazowanie węgla rozumiane jest jako szereg wielokierunkowych przemian o charakterze termicznym i chemicznym zachodzących w podwyższonej temperaturze przede wszystkim między częścią organiczną substancji węglowej a czynnikiem zgazowującym (takim jak np. tlen, para wodna, dwutlenek węgla lub dowolna ich mieszanina). Całość tych przemian prowadzi do powstania palnego gazu, który ma zastosowanie jako paliwo lub surowiec chemiczny. Procesowi zgazowania, oprócz węgla kamiennego i brunatnego, mogą zostać również poddane torf, biomasa, koks naftowy, pozostałości rafineryjne.

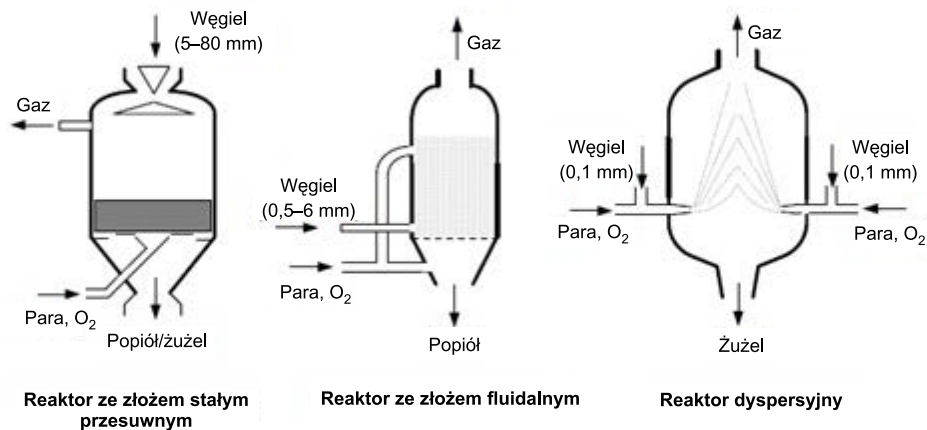
Podstawową różnicą pomiędzy spalaniem a zgazowaniem węgla jest to, iż ten pierwszy bazuje tylko na reakcji częściowego utleniania natomiast zgazowanie bazuje na reakcji całkowitego ulatniania. Biorąc pod uwagę reaktywność węgla, typ reaktora czy też założony produkt finalny możemy do zgazowania wykorzystać różne media (jak np. powietrze, powietrze i para wodna, tlen i para wodna, para wodna, wodór, czy dwutlenek węgla).

Sam proces zgazowania węgla jest prowadzony niejednokrotnie w wysokiej temperaturze, przy ciśnieniu rzędu i wyższym. Powstały gaz syntezowy jest oczyszczany i uzdatniany; odzyskiwane jest ciepło. Prowadzone są procesy modyfikujące skład wytworzonego gazu, w celu wytworzenia określonych produktów końcowych, które mogą zostać dalej wykorzystane w chemii lub energetyce. Możliwa jest także sekwestracja chemiczna CO₂ i jego późniejsze sprężanie z opcją sekwestracji geologicznej (Chmielniak i Ściążko 2008; ICHPW 2008).

Możemy wydzielić dwa główne typy zgazowania węgla:

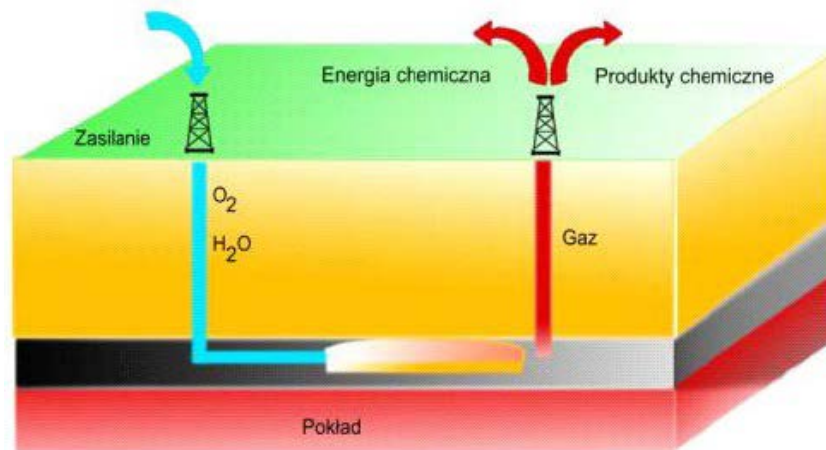
- Naziemne zgazowanie węgla (NZW) – w tym przypadku proces zgazowania jest prowadzony w specjalnie do tego zaprojektowanych reaktorach (rys. 1). Reaktory naziemnego zgazowania węgla najczęściej dzielone są na trzy typy, w zależności od przepływu paliwa w strefie reakcyjnej (Hyncar 2008; Jasiński 2010):
 - reaktory ze złożem zwartym przesuwным (*moving bed*),
 - reaktory ze złożem fluidalnym (*fluidised bed*),
 - reaktory dyspersyjne (*entrained flow*).
- Podziemne zgazowanie węgla (PZW) – w tym przypadku proces zgazowania jest przeprowadzony w złożu węgla bez konieczności wydobywania go na powierzchnię. Przeznaczoną do zgazowania i wydzieloną partię pokładu (zwaną geogenerato-

rem lub gazogeneratorem), udostępnia się z poziomu terenu przy pomocy szybów (zgazowanie szybowe) lub szeregu otworów (zgazowanie bez szybowe). (Dubiński i Stańczyk 2010). Następnie do złoża włączane jest medium zgazowujące (powietrze lub tlen), które wchodzi w reakcję z węglem (rys. 2). Proces podziemnego zgazowania węgla rozpoczyna się od zapłonu pokładu węgla, następnie z wytworzeniem się przodka ogniowego rozpoczyna się właściwy proces zgazowania, podczas którego następuje przemieszczanie się frontu ognia. W ten sposób tworzona jest kawerna wypełniona popiołem i żużlem, a nad nią rozwija się strefa spękań (Gregg i Edgard 1978; Stephans i in. 1985; Creedv i Garner 2004; Białecka 2008).



Rys. 1. Typy reaktorów naziemnego zgazowania węgla (ICHPW 2008)

Fig. 1. Types of surface coal gasification reactors (ICHPW 2008)



Rys. 2. Idea procesu podziemnego zgazowania węgla z zastosowaniem odwiertów z powierzchni (Dubiński i Stańczyk 2010)

Fig. 2. The idea of underground coal gasification process using wells from the surface (Dubiński and Stańczyk 2010)

2. Analiza opcji rzeczowych

Początek historii opcyjnego podejścia do analizy aktywów rzeczowych związany był bezpośrednio z opracowaniem modeli kwantyfikacji wartości opcji finansowych – instrumentów zaliczanych do grupy tzw. instrumentów pochodnych (derywatyw). Opcja finansowa to prawo – przywilej a nie obowiązek – nabywającego/wystawiającego opcję do kupna/sprzedaży ustalonej ilości instrumentów finansowych stanowiących przedmiot kontraktu, po ustalonej w umowie cenie w wyznaczonym terminie w przyszłości (opcja typu europejskiego) lub przed jego upływem (opcja amerykańska). Cena kupna/sprzedaży nazywana jest ceną (kosztem) wykonania, natomiast instrument finansowy, którego dotyczy umowa opcyjna, określane jest mianem instrumentu (waloru, aktywa) bazowego. Data, po której opcja traci ważność, określana jest jako termin wygaśnięcia opcji. Dwoma podstawowymi rodzajami opcji są: opcja kupna (*call*) oraz opcja sprzedaży (*put*), natomiast pozycjami, które można w stosunku do nich zajmować: pozycja długa (*long*) oraz pozycja krótka (*short*).

Metoda wyceny opcji rzeczowych, nazywana analizą opcji rzeczowych (*Real Options Analysis*, ROA) lub rachunkiem opcji rzeczowych (*Real Option Valuation*, ROV) polega natomiast na sformułowaniu kryteriów inwestycyjnych i możliwości działań operacyjnych w postaci opcji, jakie mogą, ale nie muszą, zostać zrealizowane w ramach rozważanego przedsięwzięcia. Tak rozumiane opcje oznaczają prawo – nie obowiązek – podjęcia w przyszłości nieodwracalnej operacji na posiadanych aktywach. Dysponowanie takimi opcjami oznacza zatem możliwość podjęcia określonego działania w przyszłości i czerpania z niego dodatkowego pożytku.

W modelu wyceny określa się możliwy scenariusz realizacji przedsięwzięcia, który traktuje się jako opcję, a następnie dla ustalonego poziomu parametrów wejściowych wylicza się wartość tej możliwości (*Option Premium*, OP). Strategiczna (rozszerzona) wartość okazji inwestycyjnej (*Strategic or Expanded Net Present Value*, XNPV) jest wtedy równa sumie wartości bezpośrednio mierzalnych przepływów pieniężnych NPV (*Net Present Value*) oraz premii opcyjnej OP.

W pierwszym etapie procedury wyznaczania strategicznej wartości dla rozpatrywanego przedsięwzięcia identyfikuje się dostępne źródła elastyczności decyzyjnej (opcje) oraz określa się ich typ. W przypadku opcji rzeczowych mówi się najczęściej o kilku podstawowych opcjach, które można podzielić na dwie grupy (Trigeorgis 1996; Kodukula i Papudesu 2006; Guthrie 2009):

- opcje proste:
 - opcja wyczekiwania na najlepszy moment rozpoczęcia inwestycji (opcja kupna),
 - opcja zwiększenia skali działalności (opcja kupna),
 - opcja zmniejszenia skali działalności (opcja sprzedaży),
 - opcja wstrzymania produkcji (opcja sprzedaży),
 - opcja wznowienia produkcji (opcja kupna),
 - opcja likwidacji przedsięwzięcia (opcja sprzedaży),
- opcje złożone:
 - opcja wycofania się z inwestycji wielofazowej (sekwencja opcji kupna),
 - opcja wycofania się i likwidacji inwestycji wielofazowej (sekwencje opcji kupna i sprzedaży),
 - opcja stopniowego zwiększania wydajności (sekwencja opcji kupna),

- opcja równoległa (występowanie równoległych opcji kupna),
- opcja wstrzymania – wznowienia produkcji (portfel złożony z opcji kupna i sprzedaży),
- opcja przełączenia (portfel złożony z opcji kupna i sprzedaży).

Zakres elastyczności decyzyjnej (zarówno strategicznej, jak i operacyjnej) jest związany ze specyfiką analizowanego projektu inwestycyjnego. Zidentyfikowanie dostępnych opcji oraz określenie ich rodzaju zależy w dużej mierze od potencjału firmy w zakresie zarządzania, posiadanej wiedzy technologicznej, doświadczenia, umiejętności itp.

W drugim etapie dokonuje się parametryzacji opcji. Parametryzacja opcji oznacza określenie najważniejszych parametrów, które są niezbędne, aby dokonać wyceny konkretnych opcji. Chodzi tutaj przede wszystkim o wartość i zmienność instrumentu bazowego oraz koszt wykonania opcji, ale także o pozostałe parametry niezbędne do zbudowania modelu wyceny, czyli czas istnienia opcji i krok w modelu.

W teorii opcji rzeczowych zasadniczo przyjmuje się, iż instrumentem bazowym jest wartość projektu inwestycyjnego brutto PV , natomiast nakłady inwestycyjne I stanowią w przypadku opcji kupna cenę wykonania opcji. Do wyznaczenia zmienności waloru bazowego (wartości projektu brutto PV) można wykorzystać metody eksperckie, podejście logarytmicznych stóp zwrotu z przepływów pieniężnych (*Logarithmic Cash Flow Returns*, LCFR) lub podejście logarytmicznych stóp zwrotu z wartości bieżącej (*Logarithmic Present Value Returns Approach*, LPVR). Istotnym wyzwaniem jest tutaj zidentyfikowanie tych źródeł niepewności, które w największym stopniu będą decydować o zmienności całego projektu. Czas życia opcji (zwykle liczony w latach) musi być wystarczająco długi, aby wyjaśniła się kwestia niepewności, ale jednocześnie nie za długi, tak aby wartość opcyjna nie została zmarginalizowana, np. z powodu pojawienia się konkurencji (Kodukula i Papudesu 2006).

W ostatnim etapie wybiera się model wyceny i kalkuluje wartość strategiczną. Wybór modelu zależy przede wszystkim od specyfiki i złożoności analizowanego problemu. W najczęściej wykorzystywanych metodach kratownicowych kalkulacja strategicznej wartości przebiega w dwóch etapach. W pierwszej kolejności, bazując na zmienności σ , wylicza się czynniki niezbędne do skonstruowania kratownicy. Chodzi tutaj o parametry wzrostów (u) i spadków (d) oraz odpowiadające im prawdopodobieństwa. Na podstawie obliczonych parametrów buduje się drzewo zmian wartości projektu brutto PV . W drugim etapie, w procedurze powrotnej, w każdym węźle drzewa rozpoczynając od węzłów końcowych, konstruuje się funkcję wypłaty opcji, a następnie wylicza się wartość opcyjną w każdym punkcie kratownicy. Wartość opcyjna w węźle początkowym jest jednocześnie rozszerzoną wartością przedsięwzięcia, czyli wartością strategiczną.

3. Wykorzystanie analizy opcji rzeczowych do wyceny technologii gazowania węgla – przegląd stosowanych podejść

Jak wspomniano w rozdziale wcześniejszym, początki historii teorii opcji rzeczowych związane były bezpośrednio z próbami kwantyfikacji wartości opcji finansowych. Pierwszą pracą z tej dziedziny była praca doktorska francuskiego matematyka Bacheliera (Bachelier 1900), w której zaprezentował on formułę na cenę opcji. Doskonalenie tego modelu nastąpiło dopiero w późnych latach pięćdziesiątych i wczesnych sześćdziesiątych. Były to

m.in. prace Modiglianiego i Millera (1958), Sprenklego (1961), Samuelsona (1965), Thorpa i Kassoufa (1967), Mertona (1969) oraz Chena (1970).

Za najważniejsze prace w dziedzinie opcji finansowych przyjmuje się jednak prace Blacka, Scholesa (1973) i Mertona (1973). W swoich publikacjach sformułowali oni wzór na wycenę europejskiej opcji kupna.

Pierwszą pracą, w której zaproponowano postrzeganie projektów inwestycyjnych przez pryzmat opcji finansowych, była publikacja Myersa (Myers 1977). Zaobserwował on występowanie bliskich analogii pomiędzy właściwościami opcji finansowych a możliwościami działania strategicznego i operacyjnego, które są dostępne menedżerom różnego rodzaju inwestycji rzeczowych.

Publikacje poruszające kwestię wykorzystania opcyjnego podejścia w obszarze technologii zgazowania węgla dotyczą najczęściej instalacji naziemnego zagazowania wykorzystujących blok gazowo-parowy (*Integrated Gasification Combined Cycle*, IGCC). Celem realizacji tego typu projektów jest najczęściej produkcja energii elektrycznej lub energii elektrycznej w skojarzeniu. W ramach tego typu technologii zmienność skonsolidowaną projektu szacowano biorąc pod uwagę ceny węgla, ceny praw do emisji CO₂, czy ceny produktów finalnych.

Najważniejsze opracowania w obszarze kalkulacji wartości opcyjnej instalacji bazujących na procesie zgazowania węgla prezentuje tabela 1.

Jedną z pierwszych publikacji, która prezentowała opcyjnie podejście do wyceny technologii bazujących na zgazowaniu węgla, był artykuł Herbellota z 1994 roku. W pracy rozpatrywano przypadek bloku gazowego do produkcji energii elektrycznej, w którym założono możliwość budowy instalacji zgazowania węgla celem produkcji gazu syntezowego. Symulowane były przebiegi takich zmiennych, jak cena węgla i cena gazu ziemnego, natomiast do wyznaczenia wartości opcyjnej został wykorzystany model dwumianowy (Herbelott 1994). W pierwszej kolejności przeliczona została wartość wskaźnika NPV dla przedsięwzięcia bez opcji, czyli dla sytuacji, gdzie budowa instalacji zostaje realizowana natychmiast. Uzyskano wartość -310,5 mln \$. Następnie przeliczono wartość dla przypadku, kiedy budowa następuje natychmiast, ale zarząd może wybrać, czy wykorzystuje gaz ziemny, czy gaz ze zgazowania. Uzyskano wartość strategiczną równą -271,7 mln \$. W kolejnym etapie rozpatrzono opcję czekania z budową (opcja inwestycyjna) i otrzymano wartość opcyjną na poziomie 24,1 mln \$. Finalnie uwzględniona była kombinacja dwóch opcji: czekania z budową instalacji (opcja inwestycyjna) i w przypadku jego budowy – wyłączenia w przyszłości (opcja likwidacji) i powrotu do spalania gazu.

Problematyka zastosowania opcyjnego podejścia do wyceny instalacji bazujących na procesie zgazowania węgla została szeroko ujęta w raporcie wspomagającym podejmowanie strategicznych decyzji w energetyce w Belgii, finansowanym ze środków rządowych. W dokumencie zatytułowanym „Coal Option: Evaluation of coal-based power generation in an uncertain context” przedstawiono opcyjnie podejście do ustalenia najlepszego momentu realizacji inwestycji w warunkach niepewności. Jako przykład dokonano analizy dwóch projektów: instalacji IGCC oraz układu kombinowanego z turbiną gazową pracującą na gazie ziemnym (*Natural Gas Fuelled Combined Cycle Power Plant*, NGCC). Jako zmienną stochastyczną przyjęto cenę gazu, natomiast cenę węgla (ze względu na duże zasoby rozłożone równomiernie na świecie) założono jako stałą. Celem opracowania było wyznaczenie momentu, w którym należałoby przebudować instalację NGCC na IGCC. Analiza pokazała,

TABELA 1. Najważniejsze literaturowe przykłady aplikacji analizy opcji rzeczowych do ekonomicznej oceny technologii zgazowania węgla (opracowanie własne)

TABLE 1. Most important literature examples of real option analysis applications to economic assessment of coal gasification technologies (own study)

Technologia	Rodzaj opcji	Symulowany parametr	Instrument bazowy	Cena wykonania	Opracowanie
Blok gazowy do produkcji energii elektrycznej	<ul style="list-style-type: none"> – opcja czekania z budową instalacji zgazowania węgla – opcja likwidacji instalacji – kombinacja dwóch opcji: czekania z budową i wyłączenia w przyszłości; 	ceny węgla i gazu ziemnego	wartość bieżąca brutto	nakłady inwestycyjne na gazyfikator	Herbellot 1994
Blok gazowy do produkcji energii elektrycznej	<ul style="list-style-type: none"> – opcja czekania z przebudową instalacji NGCC na IGCC 	cena gazu	wartość bieżąca brutto	nakłady inwestycyjne na instalację zgazowania	Smeers i in. 2001
PC, IGCC, IGCC (CCS ready)	<ul style="list-style-type: none"> – opcja czekania z budową instalacji CCS 	cena praw do emisji CO ₂	wartość bieżąca brutto	wydatki kapitałowe na rozszerzenie instalacji	Sekar 2005
NGCC, SCPF, IGCC, POCSCPF, PRCIGCC	<ul style="list-style-type: none"> – opcja czekania z budową bloku 	podatek węglowy	wartość bieżąca brutto	nakłady inwestycyjne na budowę bloku	Reedman, Graham i Coombes 2006, 2006a
IGCC, NGCC	<ul style="list-style-type: none"> – opcja przełączenia pracującej na węglu instalacji IGCC na gaz ziemny 	ceny węgla i gazu	przepływy pieniężne	koszty przełączenia	Abadie, Chamorro 2008, 2009
Instalacja naziemnego zgazowania węgla kamiennego do produkcji metanolu	<ul style="list-style-type: none"> – rozszerzenie instalacji do skali przemysłowej 	wartość bieżąca brutto	wartość bieżąca brutto	nakłady inwestycyjne na rozbudowę instalacji	Kwaśniewski i in. 2014

że dla rozpatrywanego okresu 2000–2010 optymalny rok transformacji to 2006 (Smeers i in. 2001).

Kolejnym przykładem w tym temacie była publikacja Sekara, który przeanalizował trzy alternatywne technologie wytwarzające energię elektryczną. Pierwszą był klasyczny blok spalania węgla z kotłem pyłowym (*Pulverized Coal*, PC), drugą blok bazujący na zgazowaniu tego samego surowca (IGCC), a ostatnią blok IGCC przygotowany wstępnie

do zainstalowania modułu wychwytu i składowania ditlenku węgla (*Carbon Capture and Storage, CCS*). Wszystkie rozpatrywane instalacje pozwalają na dobudowanie bloku CCS, aczkolwiek wstępne inwestycje w tym kierunku powodują, że całkowite nakłady finalnie są mniejsze. Autor dokonuje oceny efektywności ekonomicznej rozpatrywanych technologii wykorzystując analizy zdyskontowanych przepływów pieniężnych (*Discounted Cash Flow Analysis, DCF*) i opcji rzeczowych ROA, zakładając zmienność ceny praw do emisji CO₂. Otrzymane wyniki pokazują, że wartość elastyczności decyzyjnej, związanej z możliwością budowy bloku CCS, rośnie wraz ze wzrostem ceny praw do emisji CO₂ oraz jej zmienności (Sekar 2005).

Reedman, Graham i Coombes (Reedman i in. 2006, 2006a) szacowali natomiast strategiczną wartość różnych technologii do produkcji energii elektrycznej, biorąc pod uwagę opcję opóźnienia inwestycji (opcja czekania). Rozpatrywane technologie to blok gazowo-parowy zasilany gazem ziemnym (*Natural Gas Fuelled Combined Cycle Power Plant, NGCC*), superkrytyczny blok spalania z kotłem pyłowym (*Supercritical Pulverised Fuel Black Coal Power Plant, SCPF*), blok IGCC, superkrytyczny blok spalania z kotłem pyłowym wyposażony w moduł wychwytu CO₂ po spalaniu (*Supercritical Pulverised Fuel Black Coal Power Plant Fitted with Post-Combustion Capture of Carbon Dioxide, POCSCPF*) oraz blok IGCC wyposażony w moduł wychwytu CO₂ przed spalaniem (*Black Coal Fuelled Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant Fitted with Precombustion Capture of Carbon Dioxide, PRCIGCC*). Otrzymane wyniki wskazały na natychmiastową inwestycję w blok SCPF oraz opóźnioną o kilka lat budowę bloku NGCC w sytuacji wzrostu cen praw do emisji.

Kwestia symulowania wpływu ryzyka i niepewności (związanych z polityką klimatyczną) na projekty sektora energetycznego (w tym również technologie zgazowania) została omówiona również w publikacji Międzynarodowej Agencji Energii z lutego 2007 roku (Yang i Blyth 2007). Dokument prezentuje metodykę wyceny wykorzystującą podejście opcyjnie. Metodologia obejmuje tradycyjne podejście – analizę zdyskontowanych przepływów pieniężnych do obliczenia wartości bieżącej netto projektu, symulację stochastyczną do tworzenia przebiegów zmiennych niepewnych oraz wycenę elastyczności decyzyjnej związanej z optymalnym czasem realizacji inwestycji. Podobnie jak w przypadku Sekara (2005) do modelowania charakterystyk głównych parametrów wykorzystywana jest symulacja Monte Carlo, różnica polega jednak na tym, że symuluje się zarówno ceny praw do emisji CO₂, jak i ceny paliw i energii. Narzędzie takie, pozwalające na modelowanie indywidualnych czynników ryzyka i porównywanie wpływu cen praw do emisji CO₂ w stosunku do cen paliw, daje możliwość analizowania różnych scenariuszy zdarzeń. Autorzy również podają, że opracowany model został pozytywnie zastosowany do ponad 10 studiów przypadków (Yang i Blyth 2006; IEA 2007).

Laurikka (2006) natomiast, wykorzystując model symulacyjny, szacuje wartość opcyjną technologii IGCC uwzględniając wpływ Europejskiego Systemu Handlu Emisjami (*European Union Emission Trading Scheme, EU ETS*). W modelu symulowane są takie parametry, jak cena energii elektrycznej, ceny paliw oraz cena uprawnień do emisji ditlenku węgla.

Wpływem cen praw do emisji CO₂ na wybór odpowiedniej technologii produkcji energii elektrycznej zajmowali się również Yun i Baker (2009). Wzięli pod uwagę dwie instalacje: elektrownię jądrową (*Nuclear Power Plant, NPP*) oraz instalację IGCC. Założono stochastyczne zmiany cen energii elektrycznej zgodnie z procesem powracania do średniej oraz

pozwoleń na emisję CO₂ zgodnie z geometrycznym ruchem Browna (*Geometric Brownian Movement*, GBM). Dla bloku IGCC symulowano wpływ zmian cen energii elektrycznej i praw do emisji CO₂, natomiast w przypadku bloku NPP – cen energii elektrycznej i nakładów inwestycyjnych. Wykorzystując rachunek opcji rzeczowych przeliczyli trzy przypadki: budowę bloku IGCC w sytuacji braku opłat za emisję, budowę bloku IGCC w sytuacji występowania opłat za emisję oraz budowę bloku NPP. W pierwszym przypadku uzyskano odpowiednio NPV na poziomie 4,71 \$/MWh oraz wartość strategiczną równą 9,80 \$/MWh, w drugim NPV –19,71 \$/MWh i wartość strategiczną 1,65 \$/MWh, a w trzecim NPV –3,45 \$/MWh i wartość opcyjną 2,09 \$/MWh.

Interesującym projektem inwestycyjnym, do wyceny którego zastosowano podejście opcyjne, była instalacja Shenhua CTL w Chinach. W bloku tym wykorzystano proces zgazowania węgla oraz syntezę Fishera-Tropscha celem produkcji paliw płynnych (*Coal to Liquids*, CTL). Symulując przebieg cen ropy naftowej oraz wykorzystując drzewo dwumianowe, obliczono wartość opcji czekania z podjęciem inwestycji. Wyniki pokazały, że w przypadku dojrzałej technologii rozsądnie jest podjąć inwestycję natychmiast, natomiast w sytuacji, kiedy technologia nie jest w pełni dojrzała, lepiej jest poczekać jeden rok z budową (Teng i in. 2011).

Abadie, Chamorro (2008, 2009) w swoich pracach szeroko analizują wykorzystanie opcyjnego podejścia do wyceny elastyczności decyzyjnej związanej z dwoma technologiami do produkcji energii elektrycznej: bloku NGCC oraz instalacji IGCC. W przeciwieństwie do bloków spalania, instalacje zgazowania mogą być zasilane nie tylko węglem kamiennym i brunatnym, ale również torfem, biomasą, koksem naftowym, ropą naftową, olejem opałowym i innymi pozostałościami rafineryjnymi. Analizowany jest następujący przypadek: możliwość przełączenia pracującej na węglu instalacji IGCC na gaz ziemny. Modelowane są przebiegi cen węgla i gazu, wykorzystywany jest proces powracania do średniej. Obliczenia numeryczne obejmują modele dwu- oraz czteromianowy. Autorzy kalkulują zatem wartość elastyczności, gdzie w każdym momencie założonego przedziału czasowego inwestor może wybrać, czy zainwestować w blok NGCC, zwykły blok IGCC, blok IGCC z możliwością przełączenia na inny rodzaj paliwa wsadowego, czy ostatecznie porzucić inwestycję. W pierwszej kolejności rozpatrywana jest natychmiastowa inwestycja w blok NGCC. Zakładając stały współczynnik wzrostu cen energii elektrycznej i gazu, kalkulowana jest wartość wskaźnika NPV. W kolejnym etapie, dla takich samych wyjściowych poziomów cen, kalkulowana jest wartość opcyjna. W dalszej części opracowania analizowane są dwa przypadki: natychmiastowa inwestycja oraz możliwość czekania z budową bloku IGCC z możliwością przełączenia pomiędzy paliwami. Wynikowe wartości obliczane są dla różnych scenariuszy cenowych i parametrów procesów stochastycznych. Finalnie, dla różnych kombinacji cen węgla i gazu ziemnego, dostarczana jest informacja, czy zainwestować w blok NGCC, elastyczny blok IGCC, czy zaniechać inwestycji.

Kwestię rachunku opcji rzeczowych w obszarze energetyki, w tym także technologiach zgazowania węgla, poruszył szeroko He w swojej rozprawie doktorskiej pt. „Real Options in the Energy Markets” (He 2007). Oprócz podstawowych opcji, zaprezentował on również procedurę praktycznego wykorzystania teorii opcji rzeczowych do kalkulacji wartości elastyczności decyzyjnej związanej z możliwością operacyjnego przełączenia pomiędzy różnymi paliwami w instalacjach do produkcji energii elektrycznej. Ze względu na możliwość zgazowania ropy naftowej, ciężkich rafineryjnych paliw płynnych, biomasy, czy stałych

odpadów miejskich, instalacja IGCC została podana jako przykład. W problemie przełączenia, wybór paliwa determinowany jest przez koszty paliw oraz przełączenia pomiędzy alternatywnymi modułami. Wartość opcji przełączenia pomiędzy różnymi paliwami wsadowymi jest wtedy równa skumulowanym oszczędnościom kosztów bloku umożliwiającego przełączenie w stosunku do bloku, który może operować tylko na jednym paliwie.

W literaturze polskiej jedynym jak dotąd opracowaniem z zakresu wykorzystania rachunku opcyjnego do oceny efektywności ekonomicznej technologii zgazowania węgla, jest część tematu badawczego nr 8.3.2. pt. „Ocena projektów naziemnego i podziemnego zgazowania węgla z wykorzystaniem opcji rzeczowych”, realizowanego w ramach zadania badawczego: „Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt. „Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”. W projekcie, dla dwóch referencyjnych technologii naziemnego zgazowania węgla w reaktorze Shell, ukierunkowanych na wytwarzanie metanolu (417 tys. Mg/rok) i nieposiadających możliwości sekwestracji ditlenku węgla (jedna zasilana węglem kamiennym, druga węglem brunatnym), analizowane są trzy opcje:

- budowy modułu wychwytu i sekwestracji CO₂,
- rozszerzenia instalacji do skali przemysłowej,
- rozszerzenia łańcucha technologicznego do produkcji olefin z jednoczesnym rozszerzeniem skali.

W celu obliczenia wartości opcyjnej opracowano metodykę ekonomicznej oceny technologii zgazowania węgla z wykorzystaniem analizy opcji rzeczowych oraz zbudowano model wyceny. Jak dotąd, udało się przeanalizować jeden przypadek, tj. sekwencyjną, składaną opcję czekania i wzrostu skali (ok. 2 mln Mg metanolu rocznie) dla technologii naziemnego zgazowania węgla kamiennego. We wstępnej analizie zdyskontowanych przepływów pieniężnych (*Discounted Cash Flow Analysis*, DCF) uzyskano ujemną wartość zaktualizowaną netto (*Net Present Value*, NPV) na poziomie 1 091,8 mln zł. W obrębie rachunku opcji rzeczowych obliczono wartość opcyjną, która okazała się dodatnia (3 508,5 mln zł) (Kwaśniewski i in. 2014).

Wykorzystanie opcyjnego podejścia w obszarze zgazowania węgla dotyczy tylko instalacji naziemnych. Wynika to z faktu, że pomimo ponad stuletniej historii i kilkudziesięciu instalacji testowych i pilotowych, technologia podziemnego zgazowania węgla nie jest jeszcze w pełni dojrzała do jej powszechnego zastosowania w skali przemysłowej.

Zakończenie

Specyfika oraz ciągły rozwój technologii zgazowania węgla stanowią przyczynek konieczności stosowania takich metod oceny ekonomicznej tego typu przedsięwzięć, które uwzględnią wszystkie najważniejsze czynniki – w tym również elastyczność decyzyjną – wpływające na ich wartość. Metodą, która bierze pod uwagę możliwości modyfikowania analizowanego projektu w fazie operacyjnej jest analiza opcji rzeczowych. Procedura szacowania strategicznej wartości w podejściu opcyjnym w obszarze technologii zgazowania węgla pozwala zatem na uwzględnienie takich możliwości, jak zmiana wykorzystywanego paliwa wejściowego, przełączenie na wytwarzanie alternatywnego produktu finalnego, czy też dobudowanie instalacji CCS.

Dotychczasowe publikacje z zakresu oceny efektywności ekonomicznej technologii zgazowania węgla z zastosowaniem rachunku opcji rzeczowych dotyczyły przede wszystkim problemu wyboru bardziej efektywnej ekonomicznie naziemnej technologii produkcji energii elektrycznej. Najczęściej porównywane są ze sobą rozwiązania bazujące na wykorzystaniu gazu ziemnego i węgla, czyli bloki IGCC oraz NGCC. W kategoriach opcji przedstawiany jest również problem modyfikacji technologii polegający przykładowo na możliwości późniejszej przebudowy instalacji w kierunku wychwytywania i magazynowania CO₂. Dominuje wykorzystanie procesów stochastycznych do modelowania zmienności cen energii elektrycznej, praw do emisji CO₂ oraz cen paliw pierwotnych, takich jak węgiel czy gaz ziemny. Zagadnienia modelowania opcji rozwiązywane są najczęściej z wykorzystaniem drzew dwumianowych.

Wartość dodana, którą tworzą prace prowadzone przez AGH i IGSMiE PAN w Krakowie dotyczy wyceny opcji skali, jaką niesie w przyszłości potencjalna strategia rozwoju sektora chemicznego w Polsce, zakładająca produkcję bazowych surowców chemicznych propylenu i etylenu. W praktyce oznacza ona substytucję węglem około 4 mld m³ gazu rocznie.

Zdaniem autorów najciekawszy z punktu widzenia poznawczego obszar zastosowania rachunku opcyjnego w procesach podejmowania decyzji inwestycyjnych dla technologii zgazowania węgla dotyczył będzie w przyszłości oceny efektywności konstrukcji reaktorów zgazowania umożliwiających szeroki zakres regulacji składu chemicznego gazu syntezowego, a w konsekwencji osiągnięcia większej elastyczności produktowej, co oznacza możliwość uzyskania efektu skali przy mniejszym wolumenie produkcji.

Literatura

- Abadie, L.M. i Chamorro, J.M. 2008. Valuation of Energy Investments as Real Options: The case of an Integrated Gasification Combined Cycle Power Plant. *Energy Economics* 30, s.1850–1881.
- Abadie, L.M. i Chamorro, J.M. 2009. The Economics of Gasification: A Market-Based Approach. *Energies* 2, s. 662–694.
- Bachelier, L. 1900. *Theorie de la speculation, annals de l'ecole normale superieure*.
- Białecka, B. 2008. *Podziemne zgazowanie węgla. Podstawy procesu decyzyjnego*, GIG, Katowice.
- Black, F. i Scholes, M. 1973. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. *Journal of Political Economy* Vol. 81, s. 637–654.
- Chen, A. 1970. A model of warrant pricing in a dynamic market. *J. Finance* 25, s. 41–60.
- Chmielniak, T. i Ściążko, M. 2008. *Czysta energia produkty chemiczne i paliwa z węgla – ocena potencjału rozwojowego. Zgazowanie węgla*. Wyd. IChPW.
- Creedy, D.P. i Garner, K. 2004. *Clean Energy from Underground Coal Gasification in China*, DTI Cleaner Coal Technology Transfer Programme, Report No. COAL r2R250, DTI/Pub URN 03/1611.
- Dubiński, J. i Stańczyk, K. 2010. Podziemne zgazowanie węgla – doświadczenia światowe i eksperymenty prowadzone w KD Barbara. *Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Materiały Konferencyjne*, Kraków.
- Greg, D.W. i Edgar, T.F. 1978. Underground Coal Gasification. *AIChE Journal* Volume 24, Issue 5, p. 753–781.
- Guthrie, G. 2009. *Real Options in Theory and Practice*, Oxford University Press.
- He, Y. 2007. Real Options in the Energy Markets, Hubei, China.
- Herbelott, O. 1994. Option valuation of flexible investments: the case of a coal gasifier. *Massachusetts Institute of Technology*, January.
- Hyncar, J. 2008. *Kierunki rozwoju procesów zgazowania paliw*, KARBO.
- IEA 2007. *Climate Policy Uncertainty and Investment Risk*, International Energy Agency, March.
- ICHPW 2008. *Czysta energia, produkty chemiczne i paliwa z węgla – ocena potencjału rozwojowego*, Praca zbiorowa, Wydawnictwo IChPW, Zabrze.
- Jasiński, A. 2010. *Zgazowanie jako czysta technologia wykorzystywania surowców zawierających węgiel*, KARBO.

- Karcz, A. i Ściążko, M. 2006. Energochemiczne przetwórstwo węgla – szansa dla górnictwa węglowego? *Mat. Konf. Szkoły Eksploatacji Podziemnej*, PAN, Kraków.
- Kodukula, P. i Papudesu, C. 2006. *Project Valuation Using Real Options A Practitioner's Guide*, J. Ross Publishing, Inc.
- Kwaśniewski i in. 2014 – Kwaśniewski, K., Kopacz, M., Grzesiak, P. i Kapłań, R. 2014. Ekonomiczna ocena technologii zgazowania węgla ze szczególnym uwzględnieniem sekwencji składanej opcji czekania i wzrostu skali. *Przegląd Górniczy* t. 70, nr 11.
- Laurikka, H. 2006. Option Value of Gasification Technology within an Emissions Trading Scheme. *Energy Policy* 34, Issue 18, December, s. 3916–3928.
- Merton, R.C. 1969. Lifetime portfolio selection under uncertainty: The Continuous-Time Case. *Review of Economics and Statistics* Vol. 51, s. 247–257.
- Merton R.C., 1973. Theory of Rational Option Pricing. *Bell Journal of Economics and Management Science* Vol. 4, s. 637–654.
- Modigliani, F. i Miller, M. 1958. *The Cost of Capital Corporation Finance and the Theory of Investment*, University of Chicago.
- Myers, S.C. 1977. Determinants of Capital Borrowing. *Journal of Financial Economics* Vol. 5, No. 2, s. 147–176.
- Reedman i in. 2006 – Reedman, L., Graham, P., Coombes, P. i Vincent D., 2006. Impact of carbon price uncertainty on investment in selected electricity generation options. *Technology Assessment Report* 59.
- Reedman i in. 2006a – Reedman, L., Graham, P. i Coombes, P., 2006a. Using a Real Options Approach to Model Technology Adoption under Carbon Price Uncertainty: An Application to the Australian Electricity Generation Sector. *Economic Record* Vol. 82, No. S1.
- Samuelson, P. 1965. Rational Theory of Warrant Pricing. *Indus. Management Rev.* 6 (Spring), s. 13–31.
- Sekar, C.R. 2005. *Carbon Dioxide Capture from Coal-Fired Power Plants: A Real Options Analysis*; Master of Science Dissertation, Massachusetts Institute of Technology.
- Smeers i in. 2001 – Smeers, Y., Bolle, L. i Squilbin, O. 2001. *Coal Options: Evaluation of coal-based power generation in an uncertain context: Final report*, OSTC Global Change and Sustainable Development 1996–2000, Sub-programme 2.
- Sprenkle, C. 1961. Warrant Prices as indicator of expectation. *Yale Economic Essays* 1, s. 179–232.
- Stephens i in. 1985 – Stephens, D.R., Hill, R.W. i Borg, I.Y. 1985. *Underground Coal Gasification Review*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA UCRL-92068.
- Teng i in. 2011 – Teng, Y., Han, L., Li, Ch. i Zhao, H. 2011. Real option analysis on coal-to-oil project. *Energy Procedia* 5, s. 48–52.
- Thorp, E. i Kassouf, S. 1967. *Beat the market*, Random House, New York.
- Trigeorgis, L. 1996. Evaluating leases with complex operating options. *European Journal of Operational Research* Vol. 91, s. 315–329.
- Yang, M. i Blyth, W. 2006. *Impact of Climate Change Policy Uncertainty on Power Generation Investments, a working paper of the IEA for COP12*, LTA/2006/01, Paris.
- Yun, T. i Baker, R. 2009. Analysis of a power plant investment opportunity under a carbon neutral world. *Investment Management and Financial Innovations* Volume 6, Issue 4.



Zadanie badawcze **„Opracowanie technologii zgazowania węgla dla wysokoefektywnej produkcji paliw i energii elektrycznej”** finansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach strategicznego programu badań naukowych i prac rozwojowych pt.: **„Zaawansowane technologie pozyskiwania energii”**.



