

Jerzy STOPA*, Piotr KOSOWSKI**

Wpływ sekwestracji geologicznej na koszty wytwarzania energii w elektrowniach węglowych i gazowych

STRESZCZENIE. Rosnące zagrożenie efektem cieplarnianym, związane z gwałtownym wzrostem antropogenicznej emisji dwutlenku węgla staje się coraz poważniejszym problemem. W przypadku potwierdzenia się hipotezy o znacznym wpływie dwutlenku węgla na ocieplanie się klimatu, sekwestracja węgla stanie się koniecznością i najprawdopodobniej zostanie wymuszona na drodze administracyjnej. Koszty tej operacji poniosą konsumenci energii w postaci zwiększonych cen nośników energii (forma podatku) lub samej energii (opłaty za emisję lub koszty jej uniknięcia). Analiza przeprowadzona w artykule wskazuje na bardzo duży wzrost cen nośników energii w przypadku wprowadzenia podatku uzależnionego od kosztów sekwestracji. Opłata za emisję mają również duży wpływ na koszty wytwarzania energii. Przy dużym wzroście kosztów nadzieją dla sektora energetycznego opartego na węglu jest szybki rozwój technologii separacji i przechwytywania dwutlenku węgla, rozwój nowatorskich technologii spalania np. spalania w czystym tlenie oraz ścisła współpraca z sektorem naftowym np. poprzez wykorzystywanie dwutlenku węgla w procesach ulepszonych metod eksploatacji złóż ropy naftowej.

SŁOWA KLUCZOWE: sekwestracja, efekt cieplarniany, koszty energii

* Dr hab. inż., ** Mgr inż. — Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, Kraków;
e-mail: stopa@agh.edu.pl, kosowski@agh.edu.pl

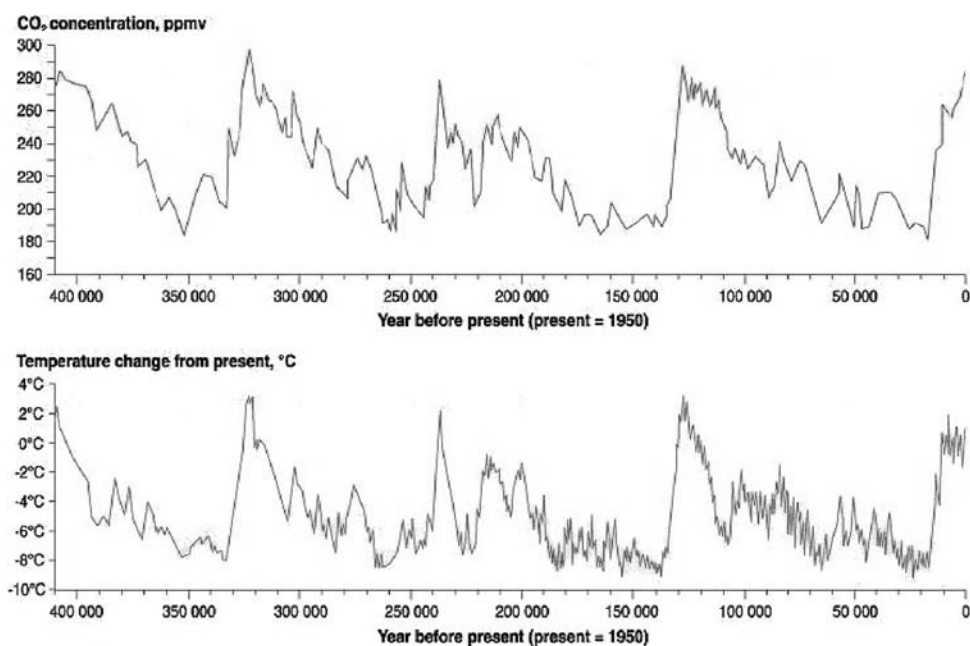
Recenzent: doc. dr hab. inż. Radosław TARKOWSKI

Wprowadzenie

Problem emisji gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla do atmosfery staje się w ostatnim czasie jednym z najpoważniejszych i najpilniejszych do rozwiązania. Choć wpływ antropogenicznej emisji dwutlenku węgla na globalne ocieplenie nie został do końca potwierdzony, to dane uzyskane m.in. z rdzeni lodowych ze stacji Wostok na Antarktydzie (rys. 1.) potwierdzają bardzo ścisłą korelację pomiędzy zawartością CO₂ w atmosferze, a temperaturą panującą na ziemi w ciągu ostatnich ponad 400 tys. lat.

W sytuacji gdy antropogeniczna emisja dwutlenku węgla bardzo gwałtownie rośnie, zwłaszcza w krajach rozwijających się, konieczne stają się podejmowane od jakiegoś czasu próby jej znacznego ograniczenia.

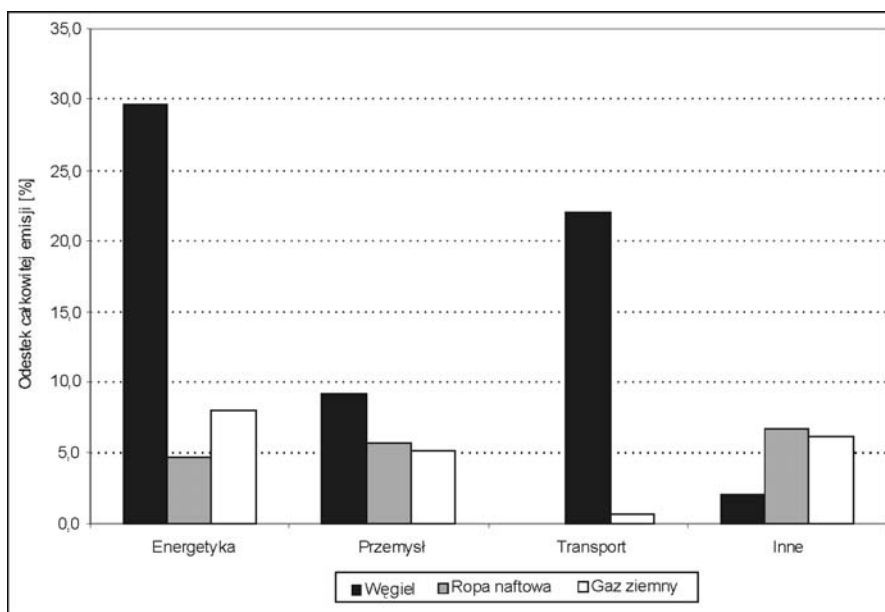
Struktura światowej emisji dwutlenku węgla, z podziałem na rodzaj używanego paliwa oraz źródło emisji ukazana jest na rysunku 2. Największymi emitentami CO₂ są energetyka, przemysł oraz transport. W energetyce oraz przemyśle wciąż przeważającym paliwem jest węgiel, natomiast w transporcie zdecydowanie dominuje ropa naftowa, przy czym w dwóch pierwszych sektorach gospodarki emisja pochodzi z dużych, stacjonarnych źródeł, a w transporcie jest bardzo rozproszona. Pierwszym celem działań, mających na celu zmniejszenie



Rys. 1. Zmiany koncentracji CO₂ w atmosferze i temperatury panującej na Ziemi uzyskane z rdzeni lodowych ze stacji Wostok

Źródło: [6]

Fig. 1. Temperature and CO₂ concentration in the atmosphere from the Vostok ice core



Rys. 2. Struktura antropogenicznej emisji dwutlenku węgla z podziałem na rodzaj paliwa i źródło emisji
Źródło: [4]

Fig. 2. Structure of anthropogenic emission of CO₂ and its division due to kind of fuel and source of emission

emisji CO₂ powinny się zatem stać elektrownie i duże zakłady przemysłowe, ponieważ o wiele łatwiej jest ograniczyć emisje lub przechwycić i składować gazy cieplarniane z dużych, stacjonarnych źródeł niż z setek tysięcy drobnych emitentów, występujących w sektorze transportowym.

Spośród wielu propozycji rozwiązania problemu emisji dwutlenku węgla jedną z najbardziej popularnych i najłatwiejszych do zrealizowania jest jego podziemna sekwestracja. Dodatkowo sprzyjającym czynnikiem dla tego typu działań jest rosnące zainteresowanie firm z sektora naftowego, często powiązane z możliwością efektywnego wykorzystania CO₂ w procesach intensyfikacji wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego. Naturalnym celem dla tej metody są duże, stacjonarne źródła emisji [3].

Tradycyjnym problemem jest jednak koszt separacji, transportu oraz włączania CO₂ do struktur geologicznych oraz sposób jego pokrycia. Istnieje wiele pomysłów na rozwiązanie tego problemu. Z jednej strony system opłat za emisję gazów cieplarnianych, a z drugiej plany obłożenia wykorzystywanych paliw podatkami i opłatami, mającymi pokryć koszty sekwestracji dwutlenku węgla [4]. Istotnym czynnikiem staje się jednak wpływ tych zamiarów na zwiększenie kosztów produkcji energii elektrycznej oraz konkurencyjność surowców energetycznych.

W artykule autorzy przedstawiają na podstawie własnych obliczeń oraz danych dostępnych w literaturze przedmiotu [1, 5] wpływ sekwestracji CO₂ na koszty wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach węglowych i gazowych, w przeliczeniu zarówno na 1 tonę wykorzystywanego paliwa, jak i na 1 kW·h wyprodukowanej energii.

Analiza wpływu sekwestracji na koszty wytwarzania energii

Analizie poddano dwie technologie spalania węgla — PC (kotły pyłowe) i IGCC (zintegrowany cykl ze zgazowaniem węgla) oraz jedną spalania gazu ziemnego — NGCC (blok gazowo-parowy na gaz ziemny) — tabela 1.

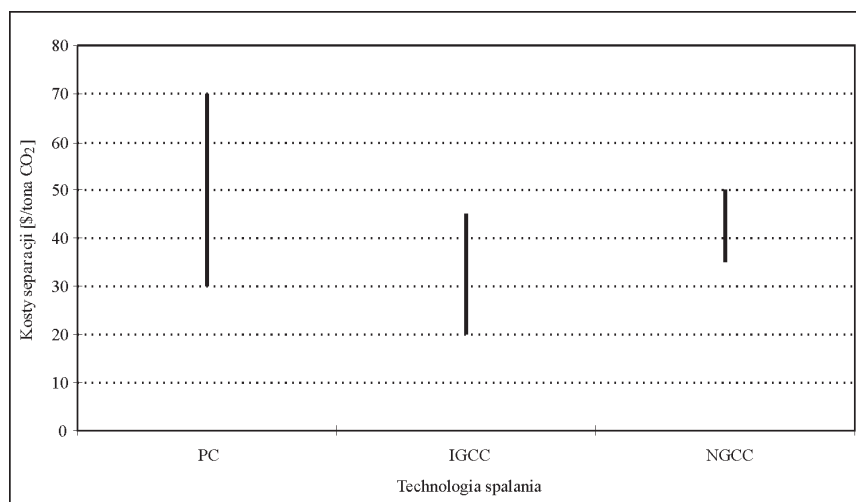
TABELA 1. Sprawność elektrowni oraz koszty separacji dwutlenku węgla

TABLE 1. Efficiency of power plants and costs of CO₂ separation

Technologia spalania	Średnia sprawność elektrowni [%]	Koszt separacji [USD]	
		min.	max.
PC	0,32	30	70
IGCC	0,36	20	45
NGCC	0,47	35	50

Źródło: [2]

Najpoważniejszy koszt w procesie sekwestracji dwutlenku węgla pochodzącego z elektrowni jest ponoszony w trakcie separacji CO₂ z gazów spalinowych. Dane na temat tych kosztów dla poszczególnych technologii spalania zaprezentowane są w tabeli 1 oraz na rysunku 3. Największy zakres potencjalnych kosztów występuje w przypadku najbardziej



Rys. 3. Koszty separacji dwutlenku węgla ze spalin dla poszczególnych technologii spalania

Źródło: [2]

Fig. 3. Costs of CO₂ separation from flue gases for different technologies of combustion

powszechniej technologii spalania węgla w kotłach pyłowych. O wiele mniejszy jest w przypadku technologii IGCC oraz NGCC.

Transport na miejsce przechowywania oraz wtłaczanie do podziemnych struktur geologicznych, to koszt zdecydowanie mniejszy i oscylujący między 5 a 15 USD na tonę CO₂. [2]. W artykule przyjęto koszt średni na poziomie 10 USD na tonę CO₂.

W celu oszacowania wpływu sekwestracji na koszty wytwarzania energii, obliczono koszty sekwestracji w przeliczeniu na tonę spalanego paliwa oraz kW·h produkowanej energii. Przyjęto, że z jednej tony węgla powstają 3 tony CO₂, a z 1 tony gazu ziemnego 2,75 tony CO₂ [4].

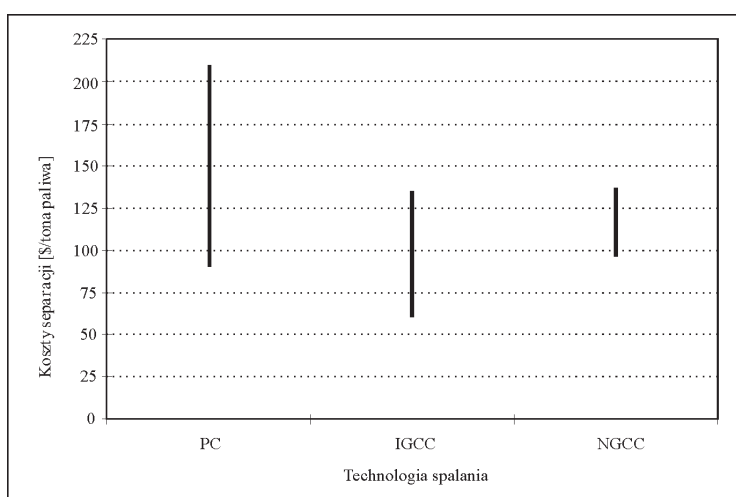
Wyniki obliczeń przedstawia tabela 2, a ich graficzne ujęcie rysunki 4–7.

TABELA 2. Koszty separacji i sekwestracji w przeliczeniu na tonę paliwa oraz kW·h wyprodukowanej energii

TABLE 2. Costs of separation and sequestration per one ton of fuel and one kW·h of produced electricity

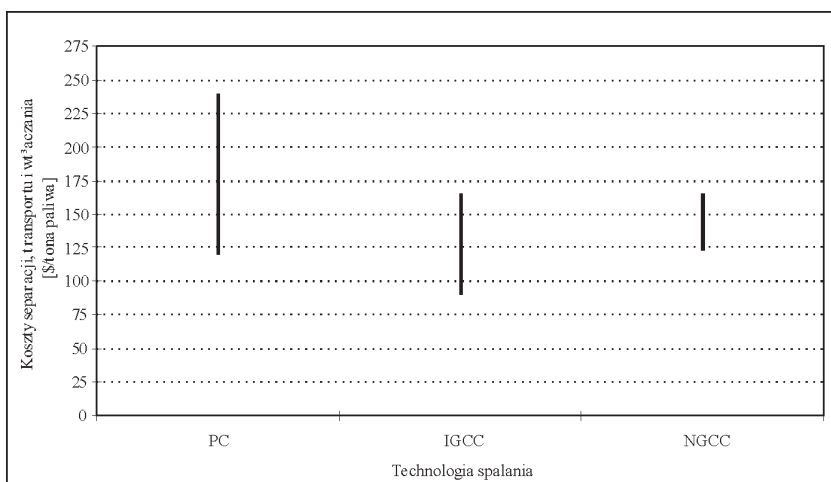
Technologia spalania	Koszt separacji [USD/tona paliwa]		Koszt separacji [USD/kW·h]		Koszt sekwestracji [USD/tona paliwa]		Koszt sekwestracji [USD/kW·h]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
PC	90	210	0,041	0,095	120	240	0,054	0,108
IGCC	60	135	0,024	0,054	90	165	0,036	0,066
NGCC	96,25	137,5	0,021	0,03	123,75	165	0,027	0,036

Źródło: Obliczono na podstawie tabeli 1



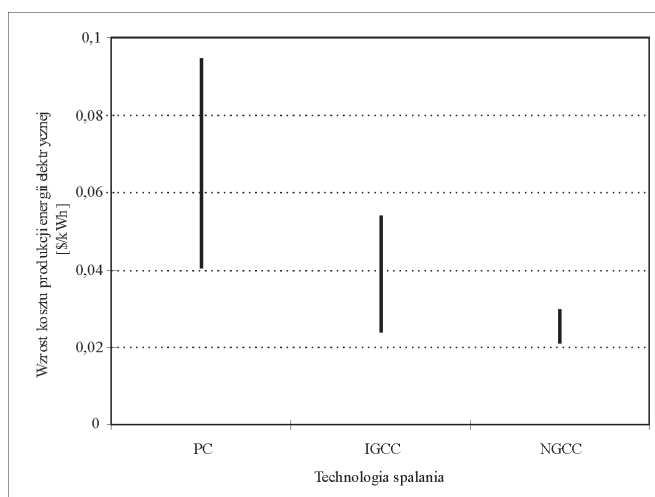
Rys. 4. Koszty separacji w przeliczeniu na tonę spalonego paliwa

Fig. 4. Costs of separation per one ton of fuel



Rys. 5. Koszty sekwestracji w przeliczeniu na tonę spalonego paliwa

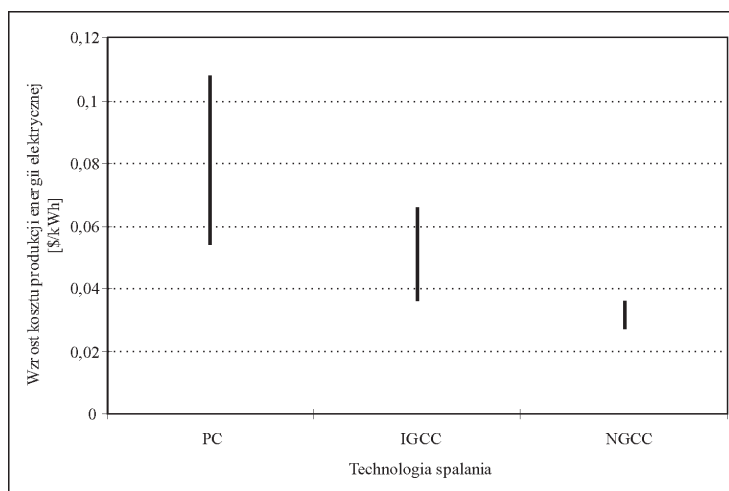
Fig. 5. Costs of sequestration per one ton of fuel



Rys. 6. Koszty separacji w przeliczeniu na kW·h wyprodukowanej energii elektrycznej

Fig. 6. Costs of separation per one kW·h of produced electricity

Koszt samej tylko separacji dwutlenku węgla ze spalin wynosi dla kotłów pyłowych od 90 do 210 USD na tonę spalonego paliwa, dla technologii IGCC zakres kosztów oscyluje pomiędzy 60 a 135 dolarów na tonę spalonego węgla. W przypadku kotłów gazowych, koszty separacji dwutlenku węgla powstałego ze spalania jednej tony gazu ziemnego zawierają się w przedziale od 96,25 do 137,5 USD. Po uwzględnieniu kosztów transportu i włączania, koszt w przeliczeniu na tonę spalonego paliwa rośnie o 30 USD dla węgla i 27,5 USD dla gazu ziemnego

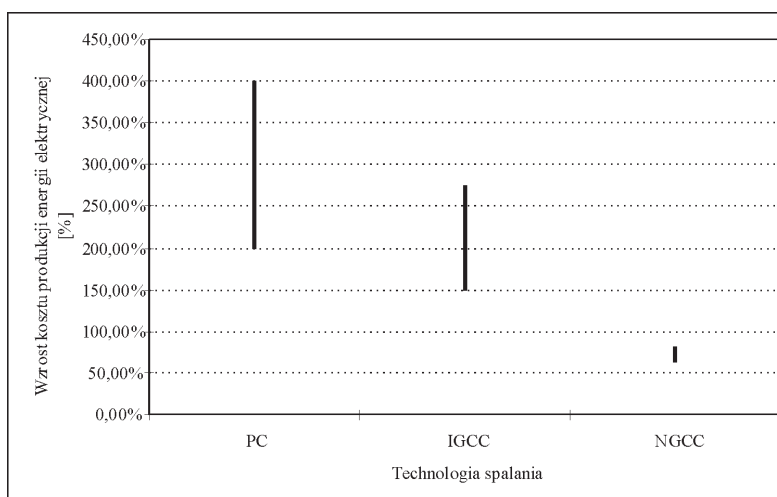


Rys. 7. Koszty sekwestracji w przeliczeniu na kWh wyprodukowanej energii elektrycznej

Fig. 7. Costs of sequestration per one kWh of produced electricity

W przypadku wzrostu kosztów produkcji energii elektrycznej spowodowanego sekwestracją, najmniejsze wartości występują w przypadku kotłów gazowych — od 0,027 do 0,036 USD/kWh, a największe w przypadku spalania w kotłach pyłowych — od 0,054 do 0,108 USD/kWh. Przy spalaniu w technologii IGCC wzrost kosztu wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej zawiera się w przedziale od 0,036 do 0,066 USD. Wzrost ten jest bardzo znaczący w porównaniu z obecnymi kosztami produkcji energii elektrycznej i jej ceną rynkową.

Procentowy wzrost kosztu wytwarzania energii ukazuje rysunek 8 oraz tabela 3.



Rys. 8. Wzrost kosztów wytwarzania energii elektrycznej związanej z sekwestracją CO₂

Fig. 8. Increase of energy production costs due to CO₂ sequestration

TABELA 3. Procentowy wzrost kosztu wytwarzania energii

TABLE 3. Percentage increase of energy production costs

Technologia spalania	Wzrost kosztu wytwarzania energii [%]	
	min.	max.
PC	200	400
IGCC	150	275
NGCC	62	83

Podsumowanie

W przypadku potwierdzenia się hipotezy o znacznym wpływie dwutlenku węgla na ocieplanie się klimatu sekwestracja węgla stanie się koniecznością i najprawdopodobniej zostanie wymuszona na drodze administracyjnej. Koszty tej operacji poniosą konsumenci energii w postaci zwiększonych cen nośników energii (forma podatku) lub samej energii (opłaty za emisję lub koszty jej uniknięcia). W przypadku dużych naturalnych źródeł emisji takich jak elektrownie, wdrożenie technologii separacji, przechwytywania i składowania dwutlenku węgla jest najłatwiejsze i najtańsze, niemniej jednak spowoduje znaczący wzrost kosztów wytwarzania energii elektrycznej na poziomie od 150 do 400% dla węgla oraz od 62 do 83% dla gazu ziemnego. Może to spowodować wzrost konkurencyjności gazu w zakresie produkcji energii elektrycznej. Naturalnym partnerem zakładów energetycznych w takich działaniach mogą stać się firmy naftowe posiadające niezbędną wiedzę i doświadczenie dotyczące technologii składowania gazów w podziemnych strukturach geologicznych.

Jednym z najważniejszych problemów związanych z sekwestracją jest jej koszt, który przy obecnie stosowanych technologiach spalania znacznie wpływa na koszty produkcji energii elektrycznej oraz sposób jego pokrycia. Wśród wielu propozycji wymienia się opłaty nakładane na stosowane w energetyce paliwa lub opłaty za faktyczną emisję gazów cieplarnianych do atmosfery.

Jak wykazano w przypadku nałożenia opłat na paliwa, przy obecnie stosowanych technologiach spalania oraz separacji i przechwytywania dwutlenku węgla, ustalenie ich właściwego poziomu będzie rzeczą stosunkowo trudną. Wynika to z bardzo dużego zakresu potencjalnych kosztów, które dla węgla wahają się od 90 do 240 USD na tonę, a także bardzo dużego zróżnicowania kosztów w zależności do stosowanej technologii spalania. W przypadku nałożenia opłat na paliwa ich wysokość kilkakrotnie przewyższałaby dzisiejszą cenę węgla, a wspomnieć należy, że w obliczeniach nie zostały uwzględnione inne koszty (np. administracyjne) związane z obsługą takich opłat, których wysokość również może być bardzo znaczna. W przypadku gazu ziemnego opłaty byłyby mniej dotkliwe, w stosunku do jego obecnej ceny. Bardziej odpowiedni wydaje się więc system opłat o odpowiedniej wielkości, powiązanych z wielkością emisji dwutlenku węgla do atmosfery.

Wpływ kosztów sekwestracji na koszt produkcji energii elektrycznej uzależniony jest w bardzo dużej mierze od technologii jej produkcji. W przypadku spalania węgla w kotłach pyłowych, koszt wyprodukowania 1 kW·h wzrasta o od 0,054 do aż 0,108 USD (wzrost o 200 do 400%). Dla elektrowni IGCC koszty wzrastają w zakresie od 0,036 do 0,066 USD/kW·h (wzrost o 150 do 275%). Najmniejszy wpływ sekwestracja ma na koszty produkcji energii elektrycznej w elektrowniach gazowych — od 0,027 do 0,036 USD/kW·h (wzrost o 62 do 83%). Tak duży wzrost kosztów wytwarzania energii w olbrzymim stopniu wpłynie na konkurencyjność paliw energetycznych, zwłaszcza węgla oraz zwiększy atrakcyjność innych źródeł energii, uznawanych obecnie za mniej opłacalne.

Przy tak dużym wzroście kosztów nadzieją dla sektora energetycznego opartego na węglu jest szybki rozwój technologii separacji i przechwytywania dwutlenku węgla, co może znacznie obniżyć koszty całego procesu. Szansą jest również rozwój nowatorskich technologii spalania np. spalania w czystym tlenie, co w bardzo dużym stopniu upraszcza najdroższy element procesu sekwestracji, czyli separację i przechwytywanie CO₂ i poważnie obniża jego koszt. Szansą może być także ścisła współpraca z sektorem naftowym np. poprzez wykorzystywanie dwutlenku węgla w procesach ulepszonych metod eksploatacji złóż ropy naftowej oraz wykorzystywanie jego doświadczeń w zakresie przesyłu oraz podziemnego magazynowania gazów. Narzędziem możliwym do wykorzystania może się również okazać ewentualny handel prawami do emisji gazów cieplarnianych, które pozostały niewykorzystane w związku z sekwestracją CO₂.

Artykuł opracowano w ramach badań własnych AGH 10.10.190.316

Literatura

- [1] DAVE N.C., DUFFY G.J., EDWARDS J.H., 2000 — Economic Evaluation of Capture and Sequestration of CO₂ from Australia Black Coal-Fired Power Stations, GHGT-5.
- [2] HERZOG H., 2000 — The Economics of CO₂ Separation and Capture. Technology, vol. 7, supplement 1, pp. 13–23.
- [3] KOSOWSKI P., RYCHLIKI St., STOPA J., 2005 — Analiza kosztów separacji CO₂ ze spalin w związku z możliwością jego podziemnego składowania. Wiertnictwo, Nafta, Gaz, r. 22/1, s. 205–210.
- [4] LATOUR-GAYET P., 2004 — Can the oil and gas industry help solve the CO₂ problem? Australian Petroleum Production and Exploration Association Conference. Canberra, Australia March 30, Schlumberger.
- [5] NGUYEN D.N., ALLINSON W.G., 2002 — The Economics of CO₂ Capture and Geological Storage. SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, Melbourne, Australia.
- [6] PETIT J.R., JOUZEL J., et al., 1999 — Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica. Nature 399 (3 June), pp 429–436.

Jerzy STOPA, Piotr KOSOWSKI

Influence of CO₂ sequestration on energy production costs in coal and natural gas fired power plants

Abstract

Nowadays increasing threat of global warming is one of the most important problems. In the case of greenhouse effect hypothesis confirmation CO₂ sequestration will be necessary and will be forced by administrative decision. Prices of energy carriers will be higher or the emission fees will increase and all consumers will bear the costs of sequestration. Analysis conducted in the article proves that increase of prices of energy carriers will be heavy if sequestration tax is introduced. Emission fees exert also a big influence on cost of energy production. In that situation the fast development of new technologies of separation and capture of carbon dioxide, new technologies of combustion (e.g. combustion in a pure oxygen) is a big chance for energy sector. The cooperation with the oil and gas industry may also be very useful. Oil and gas companies have know-how about transportation and storage of gases and carbon dioxide may be used in enhanced oil recovery processes.

KEY WORDS: sequestration, greenhouse effect, costs of energy