

## INFLUENCE OF TRANSPORT MEANS MODERNISATION ON EMISSION AND CONCENTRATION OF CARBON DIOXIDE IN THE ATMOSPHERE

Piotr Wolański \*, Dorota Oleszczak\*\*

Politechnika Warszawska

Instytut Techniki Ciepłej

00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25

tel. (+48 22) 660 52 77, 660-52-87

e-mail: [dsiwiec@itc.pw.edu.pl](mailto:dsiwiec@itc.pw.edu.pl)

### Abstract

*Transportation is the major source of anthropogenic carbon dioxide emission to the atmosphere. Flux intensity analysis of CO<sub>2</sub> from transportation sector enables one to estimate quantitative influence of that flux on CO<sub>2</sub> contents changes in the atmosphere. Various scenarios of the flux intensity change with acknowledgment of possible emissions reduction are presented in the paper. Presented results have been obtained from the computational modelling based on the global Earth carbon cycle. The model renders CO<sub>2</sub> concentrations change influenced by modern trends of limiting CO<sub>2</sub> emission from transportation and other sectors of human activity. The comparative analysis of various reducing emission variants has been carried out such as increased efficiency of combustion engines or their replacement by hybrid and fuel cells propulsions. The present tendency of increasing number of vehicles in the world has been taken into account as well.*

*Keywords: combustion, emission, transport.*

## ANALIZA WPLYWU MODERNIZACJI ŚRODKÓW TRANSPORTU NA EMISJĘ I ZAWARTOŚĆ DWUTLENKU WĘGLA W ATMOSFERZE

### Streszczenie

*Środki transportu stanowią dominujące źródło antropogenicznej emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Analiza wielkości strumienia emisji CO<sub>2</sub> w sektorze transportu pozwala oszacować ilościowy wpływ tego strumienia na zmiany zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze. W pracy zaprezentowano różne scenariusze zmian wielkości strumienia CO<sub>2</sub> z uwzględnieniem możliwej redukcji ilości tego gazu emitowanych do atmosfery. Przedstawione wyniki uzyskano z modelowania komputerowego opartego o globalny cykl węgla na Ziemi. Odtwarza ono zmiany stężenia CO<sub>2</sub> od początków ery industrializacji do czasów obecnych oraz prognozuje przyszłe zmiany stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze ziemskiej pod wpływem nowoczesnych tendencji redukcji emisji dwutlenku węgla w transporcie i innych sektorach działalności człowieka. Przeprowadzono analizę porównawczą różnych wariantów zmniejszenia emisji, takich jak zwiększenie sprawności silników spalinowych oraz zastępowanie klasycznych silników spalinowych napędami hybrydowymi lub ogniwami paliwowymi. Uwzględniono ponadto obecną tendencję wzrostu ilości pojazdów w świecie.*

*Słowa kluczowe: spalanie, emisja, transport*

Autor jest Laureatem Subsydium Fundacji na rzecz Nauki Polskiej

Autor jest stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej

## 1. Naturalny Efekt Ciężarniany i wzrost stężenia dwutlenku węgla w atmosferze

Ziemia nagrzewana jest przez wysokoenergetyczne promieniowanie słoneczne docierające do jej powierzchni w postaci promieniowania nadfioletowego oraz widzialnego. W warunkach ustalonych ilość energii transmitowanej do powierzchni Ziemi powinna być równa ilości energii wypromieniowywanej przez Ziemię w przestrzeń kosmiczną w postaci słabszego już promieniowania podczerwonego oraz energii termicznej. Temperatura powierzchni Ziemi jest jednak mocno zależna od składu oraz gęstości otaczającej ją atmosfery. Para wodna oraz dwutlenek węgla są najbardziej rozpowszechnionymi gazami zawartymi w atmosferze posiadającymi zdolność absorpcji promieniowania podczerwonego pochodzącego z powierzchni Ziemi, tzw. gazami ciężarnianymi. Inne znane gazy ciężarniane to metan, podtlenek azotu, ozon, związki chloro-fluoro-węglowe i sześćiofluorek siarki. Gazy te, ze względu na typy wiązań w cząsteczce i rodzaje składających się na nią atomów, absorbują ciepło. Stabilizują w ten sposób temperaturę planety, w przeszłości umożliwiając rozwój a obecnie utrzymanie życia na Ziemi. Dzięki temu naturalnemu zjawisku, zwanemu Efektem Ciężarnianym, średnia temperatura Ziemi wynosi  $14^{\circ}\text{C}$ . Bez naturalnego Efektu Ciężarnianego średnia temperatura Ziemi wynosiłaby ok.  $-19^{\circ}\text{C}$ , a wahania temperatury pomiędzy porą dzienną a nocną, wynosiłyby ok.  $50^{\circ}\text{C}$  [1].

Zawartość dwutlenku węgla w atmosferze jest kształtowana dzięki obiegowi węgla pomiędzy Ziemią a jej atmosferą. Jest to naturalny cykl obejmujący wiązanie węgla poprzez roślinność w procesach fotosyntezy i pochłanianie przez powierzchnie oceanów oraz uwalnianie węgla do atmosfery poprzez utlenianie materii organicznej w procesach oddychania, rozkładu, spalania oraz parowania z oceanów [2]. W czasach poprzedzających rozwój przemysłu, przed rokiem 1750, bilans cyklu węglowego kształtowały jedynie naturalne dodatnie strumienie emisji węgla do atmosfery oraz ujemne strumienie pochłaniania tego pierwiastka przez lądy i oceany.

We wczesnych latach sześćdziesiątych ubiegłego stulecia, kiedy rozwój technik badawczych pozwolił na pomiary składu atmosfery w czasie rzeczywistym, zauważono, że stężenie większości gazów ciężarnianych w atmosferze stale wzrasta, co przedstawiono na Rys. 1 na przykładzie dwutlenku węgla.

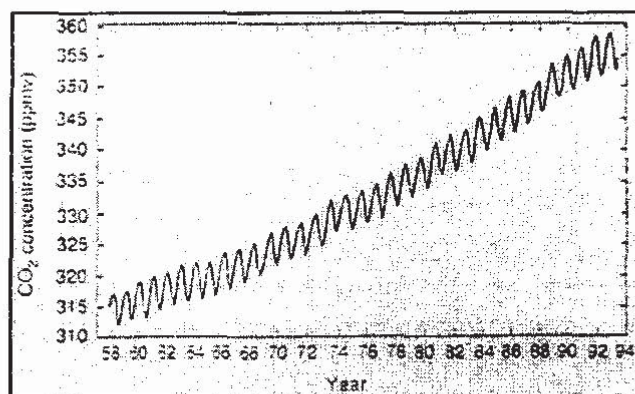


Fig. 1. Carbon dioxide atmospheric concentration records from South Pole, Antarctica  
Rys. 1. Zmierzony wzrost stężenia dwutlenku węgla ze stacji South Pole, Antarktyka

Świadomość, że istnienie gazów ciężarnianych utrzymuje pewien stały poziom temperatury na Ziemi, wywołała niepokój w części kręgów ekologicznych, postulujących, że wzrost stężenia dwutlenku węgla może wpływać na ocieplenie klimatu. Z kolei wzrost średniej temperatury mógłby przyczynić się do wędrówki stref klimatycznych, topnienia lodowców i podniesienia poziomu oceanów, powodzi, suszy, a w konsekwencji do klęsk nieurodzaju i głodu. Badania prowadzone w stacjach badawczych na całym świecie

potwierdzają systematyczny wzrost CO<sub>2</sub> oraz kilkunastu innych gazów cieplarnianych. Jako przyczynę owego wzrostu uznaje się działalność człowieka, obarczając go winą za nadmierne ilości dwutlenku węgla emitowanego do atmosfery w procesach wytwarzania energii oraz wypalania lasów. Ponadto wycinanie lasów zmniejsza absorpcję CO<sub>2</sub> z atmosfery, stając się kolejną, pośrednią przyczyną wyższego poziomu tego gazu w atmosferze. Pomimo, że ludzkość jest ponadto emitorem ogromnych ilości pary wodnej, ilości te stanowią znikomą część naturalnej zawartości H<sub>2</sub>O w atmosferze, wahając się pomiędzy 1 a 4%. Stąd, zgodnie z ustaleniami międzynarodowej organizacji United Nations Convention on Climate Change (UNFCCC) z 1994 r. oraz Protokołu z Kioto z 1997 r, zawartość pary wodnej i zmiany tych ilości w atmosferze nie są traktowane jako wynikające ze źródeł antropogennych [4].

## 2. Źródła antropogennej emisji dwutlenku węgla do atmosfery

Stężenie dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej wynosi obecnie około 370 ppm. Biorąc pod uwagę masę atmosfery wynoszącą  $5,137 \times 10^{18}$  kg, zawiera ona 760 Gt węgla. Do atmosfery emitowanych jest rocznie około 190-200 Gte węgla ze źródeł naturalnych. Wzrost emisji w ostatnich latach o 6,0-8,5 Gte węgla na rok spowodowany jest źródłami antropogennymi. Ilości te stanowią pomiędzy 3 a 4,5% emisji naturalnej. Bilans cyklu węgla wskazuje, że około 213 Gt węgla rocznie zostaje zaabsorbowane z atmosfery przez powierzchnie lądów i oceanów. Wg raportów amerykańskiego centrum ds. informacji o energii Energy Information Administration oraz innych organizacji, ogłoszonych na podstawie ogólnoswiatowych badań, roczny przyrost dwutlenku węgla w atmosferze w ostatnim dziesięcioleciu wynosi średnio 3 – 3,2 Gt C rocznie [2], [5], czyli stężenie tego gazu zwiększa się o ok. 1,5 ppm na rok.

Nie można więc jednoznacznie określić, w jakim stopniu działalność człowieka przyczynia się do wzrostu zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze, czy stanowi ok. 4% rocznej emisji naturalnej, czy ok. 4% rocznego przyrostu netto. W obu przypadkach, w skali globalnej ilości te są znikome, niemniej kręgi proekologiczne dążą do drastycznych redukcji emisji dwutlenku węgla ze źródeł antropogennych do atmosfery.

Należy przyrzeć się więc proporcjom ilości tego gazu wydalanego w ciągu roku z różnych sektorów działalności człowieka. Ludzkość produkuje dwutlenek węgla w dwojaki sposób. Głównym źródłem (ponad 75% emisji antropogennej) jest spalanie paliw kopalnych w sektorze transportu, przemysłu i w energetyce oraz w procesach produkcji cementu. W ostatnich latach dominującym emitentem stał się sektor transportu, stanowiąc ok. 40% całkowitej emisji będącej wynikiem spalania, kolejnym jest przemysł (ok. 32%), następnie sektory wytwarzania energii, głównie elektrownie konwencjonalne (25%) oraz pozostałe sektory nieenergetyczne (3%) [6]. Kolejną przyczyną coraz wyższej zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze (pozostałe 25%) jest zużywanie i wyjałowienie gleb, szczególnie wycinanie oraz karczowanie lasów. Lasy i pozostałe tereny zielone, jako „płuca Ziemi” są ogromnym absorberem atmosferycznego dwutlenku węgla, rocznie pochłaniają w procesach fotosyntezy ok. 100 Gt węgla. Zmniejszanie powierzchni zielonych zmniejsza pojemność magazynów węgla na Ziemi stając się pośrednio przyczyną większej zawartości atmosferycznej CO<sub>2</sub>. Wycięte drzewa są ponadto wypalane, dostarczając dodatkową porcję dwutlenku węgla do atmosfery [7].

### 2.1. Emisja dwutlenku węgla w sektorze transportu

Wspomnianym powyżej podstawowym antropogennym źródłem emisji dwutlenku węgla do atmosfery jest spalanie paliw kopalnych, a głównym elementem tego źródła - sektor transportu. Będąc przyczyną 40% emisji wynikającej ze spalania paliw kopalnych, transport wytwarza rocznie pomiędzy 1,8 a 2,6 Gte węgla. Definicja sektora transportu zawiera

wszystkie paliwa kopalne spalane w celach napędowych dla transportu wyłączając wszystkie jednostki pływające, cywilne oraz wojskowe, znajdujące się na wodach międzynarodowych. Jest to więc transport drogowy, kolejowy, powietrzny, oraz po wodach śródlądowych i przybrzeżnych. W skład wymienionych rodzajów transportu zalicza się transport w sektorze przemysłu i transport paliw do rurociągów doprowadzających je dalej do środków transportu bezpośredniego lub instalacji stacjonarnych oraz pozostały transport niesprecyzowany [6].

Sektor transportu drogowego stanowi główny element całkowitego sektora transportu. Szacuje się, że w obecnych czasach po świecie jeździ ok. 750 milionów pojazdów silnikowych, a emisja dwutlenku węgla z tych pojazdów stanowi około 75% całkowitej emisji z sektora transportu. Jak obliczono, emisja ta może się wahać od 1,35 w przypadku najbardziej optymistycznym do 1,95 Gte węgla na rok przy założeniach scenariusza maksymalnej szacowanej emisji. Wartość emisji rzeczywistej znajduje się pomiędzy podanymi wartościami granicznymi.

Wśród wspomnianych 750 milionów, 85% stanowią pojazdy o napędzie z zapłonem iskrowym a pozostałe 15% pojazdy o napędzie z zapłonem samoczynnym. Średnia sprawność pojazdu napędzanego klasycznym silnikiem wysokoprężnym wynosi średnio 21%, natomiast silnikiem o zapłonie iskrowym – 15%. Zakładając więc, że średnia emisja dwutlenku węgla z silnika wysokoprężnego stanowi 70% emisji średniej z silnika o zapłonie iskrowym, oraz biorąc pod uwagę średnią roczną emisję dwutlenku węgla z sektora transportu drogowego za 1.65 Gte C, jeden pojazd napędzany benzyną emituje rocznie 2,32 te węgla, natomiast napędzany olejem napędowym- 1,62 te węgla. W podziale tym pominięto część pojazdów napędzanych hybrydowo, które charakteryzują się dużo lepszymi sprawnościami, odpowiednio 37% dla hybrydy CIDI napęd elektryczny-silnik spalinowy samoczynny (Compressed Ignition Direct Injection) i 29% dla hybrydy SIDI napęd elektryczny-silnik spalinowy iskrowy (Spark Ignition Direct Injection).

Szacuje się, że liczba pojazdów na świecie będzie stale wzrastać. Niektóre prognozy zapowiadają nawet podwojenie obecnej ilości w ciągu najbliższych 50 lat. Ma to związek przede wszystkim z przyrostem populacji ludzkiej na Ziemi, której obecna liczba wynosi ok. 6 miliardów. Postępująca industrializacja oraz bogacenie się ludności świata są również ważnym czynnikiem wpływającym na takie przewidywania.

Dwutlenek węgla nie jest jedynym produktem spalania w sektorze transportu. W procesie spalania w silniku tworzą się również uboczne produkty toksyczne, takie jak tlenki azotu, tlenek węgla oraz niespalone węglowodory. Wprowadzane stopniowo coraz bardziej rygorystyczne normy dopuszczalnych emisji skutecznie rozwijają badania nad redukcją emisji związków toksycznych i dwutlenku węgla oraz przyczyniają się do poszukiwań nowych, bezemisyjnych napędów.

Jako przyjazne dla środowiska, czyli bezhałasowe i o zerowej emisji uznano napędy elektryczne, a największą popularność w tej dziedzinie zdobyło ogniwo paliwowe. W sektorze transportu, jak i do pozostałych urządzeń przenośnych najwygodniejszym w użyciu okazało się ogniwo PEM (z ang. Proton Exchange Membrane) [8]. Ogniwo działa na zasadzie odwrotnego do elektrolizy procesu łączenia wodoru, jako paliwa, z tlenem, w wyniku czego uzyskuje się prąd elektryczny napędzający pojazd, ciepło oraz parę wodną. Sprawność takiego ogniwa szacuje się obecnie na 40-50%. Samo ogniwo paliwowe rzeczywiście stanowi czyste ekologicznie źródło energii elektrycznej. Problem natomiast stanowi źródło czystego wodoru. Jediną metodą zaopatrywania pojazdów w wodór w obecnych realiach jest reforming paliwa kopalnego (najczęściej metanu) na pokładzie pojazdu. W wyniku spalania metanu w tlenie lub reformowania parowego, oprócz wodoru, jako pożądanego produktu uzyskuje się w tych procesach również dwutlenek węgla. Ponadto, biorąc pod uwagę kilkudziesięcioprocentową sprawność samego procesu reformingu

oraz realną 40% sprawność ogniwa, całkowita sprawność pojazdu wyniesie ok. 30%, nie przewyższa więc poziomu sprawności pojazdów hybrydowych [9].

Poniżej przedstawione analizy mają na celu oszacowanie ilości emisji dwutlenku węgla z sektora transportu w kolejnych 50 latach. Uwzględniono tu różne scenariusze postępu w motoryzacji. Wzięto pod uwagę możliwe kierunki i tempo rozwoju poszczególnych typów napędów, ich modernizację dla zwiększenia sprawności oraz uwzględniono zmiany ilości pojazdów na świecie w przyszłości.

### 3. Opis modelu

Model, za pomocą którego przeprowadzono poniższe analizy napisany został w języku komputerowym Fortran. Jest to model zero-wymiarowy opisujący zmiany strumieni emisji CO<sub>2</sub> w czasie. Uwzględnia on wszystkie strumienie obiegu węgla w przyrodzie, zarówno antropogenne, jak i naturalne. Podstawowe równanie modelu, bazujące na cyklu węglowym, wygląda następująco:

$$\frac{dM_{CO_2}}{dt} = \frac{dM_{SOIL}}{dt} + \frac{dM_{COMB}}{dt} + \frac{dM_{DECOMP}}{dt} + \frac{dM_{RESP}}{dt} + \frac{dM_{OC^+}}{dt} - \frac{dM_{OC^-}}{dt} - \frac{dM_{FOT}}{dt} + \frac{dM_{VOLC}}{dt} - \frac{dM_{SEQ}}{dt}$$

gdzie:

$\frac{dM_{CO_2}}{dt}$  - globalna zmiana masy dwutlenku węgla w atmosferze;

$\frac{dM_x}{dt}$  - zmiana masy dodatniego lub ujemnego strumienia x dwutlenku węgla, gdzie

x =: *SOIL*- zużywanie gleb; *COMB*- spalanie paliw kopalnych; *DECOMP*- rozkład materii organicznej, *RESP*- oddychanie roślin i zwierząt; *OC<sup>+</sup>*- parowanie oceanów; *OC<sup>-</sup>*- pochłanianie przez oceany, *FOT*- pochłanianie w procesach fotosyntezy, *VOLC*- emisja wulkaniczna i *SEQ* - wychwytywanie i magazynowanie dwutlenku węgla.

Równanie przedstawia sumę netto wszystkich strumieni emisji i pochłaniania dwutlenku węgla pomiędzy powierzchnią lądów i oceanów a atmosferą. Suma uwzględnionych strumieni dodatnich i ujemnych z kolejnych lat, po scałkowaniu, wyraża całkowitą ilość dwutlenku węgla, który powinien znaleźć się w atmosferze i pokrywa się z rzeczywistą ilością tego gazu zmierzoną w stacjach badawczych, jak pokazuje Rys. 2.

Model skonstruowany został na podstawie danych oraz oszacowań wielkości poszczególnych strumieni od roku 1750. Przyjęto, że w tym okresie rozpoczęła się globalna industrializacja, a co za tym idzie, zachwianie stabilnego dotychczas cyklu węglowego pod wpływem pojawienia się emisji pochodzących z działalności człowieka. Jest to data optymalna, ponieważ ostatnie 250 lat stwarza wystarczającą bazę danych dla prawidłowych prognoz na kolejne kilkadziesiąt lat, a zarazem stanowi granicę, poniżej której brak jest w literaturze wystarczających danych ilościowych. Teoretycznie ilość lat, dla których możliwe jest dokonywanie prognoz jest nieograniczona. Jednakże, w celu zachowania wiarygodności tych szacunków, nie powinna ona przekraczać ilości lat, na której bazuje model. Optymalnie prognozy nie powinny obejmować okresu dłuższego niż 50 lat w przyszłość.

Część uwzględnionych w modelu strumieni w ciągu minionych 250 lat jest stała w czasie (rozkład materii organicznej, oddychanie oraz emisja z wulkanów). Pozostałe strumienie okazują się być zmienne. Zaobserwowano ponadto ciekawą zależność- wzrost strumieni absorpcji CO<sub>2</sub> w naturalnych procesach fotosyntezy oraz pochłaniania netto przez

powierzchnie oceanów wraz ze wzrostem antropogenicznej emisji wynikającej ze spalania paliw kopalnych oraz użytkowania gleb. Zinterpretowano to jako automatyczną obronę systemu klimatycznego zapobiegającą gwałtownym zmianom składu atmosfery czyli utrzymywanie przez system dynamicznej równowagi. Budowa modelu odzwierciedla owo zjawisko dzięki uwzględnieniu reakcji naturalnych czynników pochłaniania na zmiany gradientu stężeń  $\text{CO}_2$  pomiędzy atmosferą a powierzchnią Ziemi lub oceanów wywołanego emisją antropogeniczną. Dane dotyczące strumieni emisji dwutlenku węgla pochodzącej ze spalania paliw kopalnych jak i z użytkowania gleb pozyskano z baz danych organizacji Carbon Dioxide Information Analysis Center [10], [11]. Strumień netto pochłaniania  $\text{CO}_2$  przez oceany oszacowano dzięki pomocy przedstawicieli światowych organizacji i uniwersytetów zajmujących się badaniami nad oceanografią [12]. Strumień fotosyntezy netto, jako jedyny nieoszacowany dotychczas w skali globalnej, został dopasowany do pozostałych strumieni wbudowanych w model za pomocą odpowiednio dobranych współczynników.

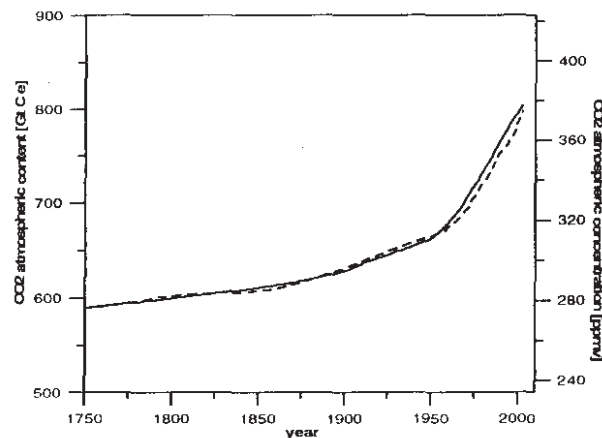


Fig. 2. Atmospheric carbon dioxide content and concentration from 1750 to 2003. Discontinuous line - measurements average, continuous line - simulation based on a balance of carbon cycle  $\text{CO}_2$  fluxes  
 Rys. 2. Stężenie atmosferyczne dwutlenku węgla w latach 1750-2003. Linia przerywana - średnia z pomiarów, linia ciągła - wynik symulacji opartej na bilansie strumieni dwutlenku węgla w obiegu węgla

Dzięki w ten sposób przygotowanemu modelowi możliwe stało się prognozowanie zawartości oraz stężenia dwutlenku węgla w atmosferze w przyszłości na podstawie wprowadzania zmian poszczególnych strumieni. W dokonywanych symulacjach narzucano zmiany wielkości jedynie strumieni antropogenicznych z krokiem czasowym 1 rok. Rozdział kolejny prezentuje przykładowe scenariusze będące skutkiem takich zmian. Dobór i zakres zmian poszczególnych strumieni antropogenicznych nie jest przypadkowy, a oparty na prawdopodobnych i przewidywanych tendencjach rozwoju wybranych dziedzin.

#### 4. Analiza wpływu modernizacji środków transportu na emisję i zawartość dwutlenku węgla w atmosferze

W referacie autorzy koncentrują się na przyszłych zmianach emisji pochodzącej ze spalania paliw kopalnych, ze szczególnym uwzględnieniem sektora transportu. Przedstawiono kilkanaście wybranych scenariuszy emisji dwutlenku węgla do atmosfery przy uwzględnieniu różnych wariantów, będących przyczyną zróżnicowanej wielkości emisji.

Pierwszy scenariusz przedstawia przypadki czysto teoretyczne, zobrazowane na Rys. 3. Zakłada się w nim trzy skrajne warianty wielkości emisji w latach 2004-2050. Linia ciągła przedstawia przypadek, gdyby obecna tendencja wzrostu emisji  $\text{CO}_2$  ze spalania paliw kopalnych oraz trendy emisji i pochłaniania pozostałych strumieni cyklu węgla zostałyby zachowane do roku 2050. Zaistnienie takiej, dość realnej sytuacji wywołałoby zdecydowany wzrost ilości dwutlenku węgla w atmosferze. Stężenie dwutlenku węgla wzrosłoby

od obecnej ilości 370 ppm do 435 ppm w roku 2050. Należy zaznaczyć, że przypadek ten zakłada brak przyrostu liczby pojazdów w ciągu nadchodzących 50 lat. Oznacza to, że realnie możliwy jest scenariusz dużo wyższych rzeczywistych emisji, co przyczyniłoby się do znacznie wyższego, niż przedstawiony na wykresie, poziomu stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze. W przypadku, gdyby od roku 2004 strumień emisji z całego sektora transportu zanikł do wartości zerowej aż do roku 2050, atmosfera zawierałaby 850 Gt węgla w roku 2050, równowartość stężenia 400 ppm. Powyżej opisany wariant daje jedynie pogląd na potencjalne możliwości redukcji emisji CO<sub>2</sub>. W najbliższym czasie przypadek ten jest nierealny do zastosowania, ponieważ oznaczałby zaprzestanie wszelkiego transportu lądowego, morskiego oraz powietrznego. Wariant ten jest wariantem granicznym. Oczywistym jest bowiem, że ograniczenie strumienia emisji ze środków transportu do zera jest w obecnych realiach niewykonalne. Kolejny zilustrowany przypadek określa również jedynie teoretyczną sytuację, w której całkowity transport drogowy, a w nim wspomniane wcześniej 750 mln pojazdów osobowych, ciężarowych oraz autobusów, przestałby funkcjonować od roku bieżącego. W takiej sytuacji stężenie atmosferyczne CO<sub>2</sub> wynosiłoby ok. 420 ppm. Krzywa obrazująca tę sytuację stanowi więc również przypadek graniczny. Regulując jedynie wielkości strumienia CO<sub>2</sub> pochodzącego ze spalania paliw kopalnych w sektorze transportu, niemożliwe jest osiągnięcie niższego poziomu dwutlenku węgla w atmosferze w zaprezentowanych latach. W założeniach nie uwzględnia się oczywiście naturalnych procesów, niezależnych od człowieka.

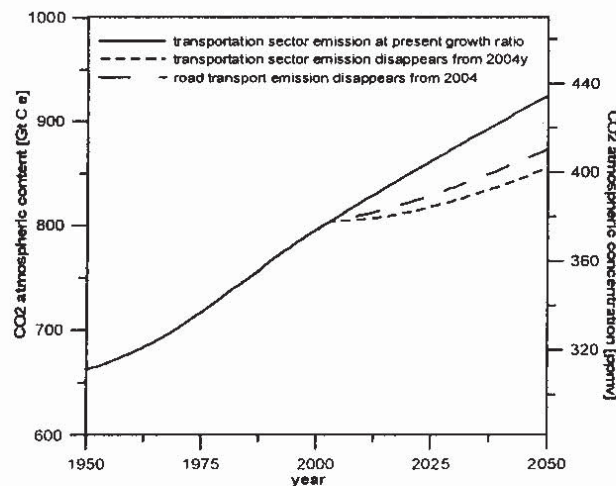


Fig. 3. Atmospheric carbon dioxide content and concentration from 1950 to 2003 with 3 variants of emissions based on computer simulations from 2004 to 2050

Rys. 3. Zawartość oraz stężenie dwutlenku węgla w atmosferze w latach 1950-2003 z trzema wariantami wielkości emisji opartymi o symulacje komputerowe w latach 2004-2050

Kolejne scenariusze opisywane w pracy prezentują bardziej prawdopodobne tendencje ograniczania emisji w większym lub mniejszym stopniu. Uwzględniają masowe wchodzenie na rynek światowy pojazdów o napędach na ogniwa paliwowe lub pojazdów hybrydowych. W poniżej przedstawionych scenariuszach uśredniono sprawności poszczególnych typów pojazdów do 30% dla obu „nieklasycznych” rodzajów napędów.

Rys. 4 a i b przedstawia obliczone ilości dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej przy trzech różnych scenariuszach. Linią ciągłą oznaczono przebieg ilości oraz stężenia CO<sub>2</sub> do roku 2050, zakładając, że silniki spalania wewnętrznego ZI oraz ZS, pozostaną jedynym źródłem napędu w transporcie drogowym. Przyjęto również, że procentowy udział silników obu typów pozostanie niezmienny. Trend wzrostu ilości dwutlenku węgla w atmosferze charakteryzuje się nieco łagodniejszym przebiegiem w przypadku, gdyby rocznie przybywało na światowych drogach 1% pojazdów (Rys. 4. a). Oznacza to osiągnięcie prawie 1 miliarda 200 milionów liczby pojazdów na świecie do roku 2050. Poziom stężenia CO<sub>2</sub> wyniosłby

w tym przypadku ok. 434 ppm. Rys. 4. b obrazuje hipotetyczną sytuację, gdyby roczny przyrost liczby pojazdów wynosił 2%. Krzywa wzrostu ilości dwutlenku węgla w atmosferze staje się bardziej stroma, osiągając w roku 2050 poziom 445 ppm przy całkowitej ilości pojazdów drogowych przekraczającej miliard dziewięćset milionów. Kolejna symulacja na Rys. 4. a i b ukazuje sytuację, gdyby od roku 2004 wszystkie pojazdy napędzane klasycznymi silnikami spalinowymi zostały zastąpione napędami na ogniwa paliwowe. W obu przypadkach wzrostu ilości samochodów o 1% i 2% widać dużą poprawę redukcji emisji CO<sub>2</sub>, przyczyniającą się do wyraźnego, globalnego spadku ilości dwutlenku węgla w atmosferze. Jeszcze lepsze rezultaty osiągane są przy założeniu, że wszystkie pojazdy napędzane klasycznie zastąpione zostaną od bieżącego roku napędami hybrydowymi typu SIDI zamiast ZI oraz CIDI zamiast ZS. Przy założonej, tej samej, co w przypadku napędów na ogniwa paliwowe, 30% sprawności pojazdu, napędy hybrydowe emitują ok. 22% mniej dwutlenku węgla niż pojazdy napędzane ogniwami paliwowymi w procesie reformingu na pokładzie pojazdu. W rezultacie stężenie omawianego gazu w atmosferze wyniosłoby odpowiednio 423 ppm dla 1% rocznego wzrostu liczby pojazdów oraz 430 ppm dla 2% wzrostu.

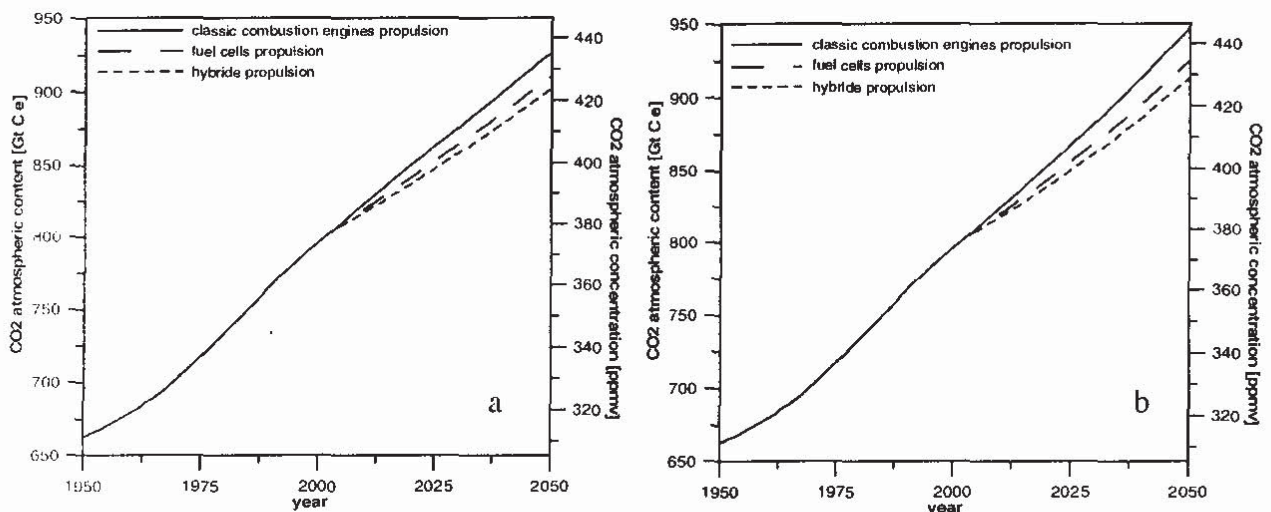


Fig. 4. Atmospheric carbon dioxide content and concentration from 1950 to 2003 with 3 variants of emissions based on computer simulations from 2004 to 2050, comparing emissions from classic combustion engines propulsion only with fuel cells propulsion only and hybride propulsion only; a- at 1% and b- at 2% growth of vehicles number in the world.

Rys. 4. Zawartość oraz stężenie dwutlenku węgla w atmosferze w latach 1950-2003 z trzema wariantami wielkości emisji opartymi o symulacje komputerowe w latach 2004-2050, porównującymi emisję z klasycznych silników spalinowych, napędów hybrydowych oraz pojazdów wykorzystujących ogniwa paliwowe; a- przy 1% oraz b- przy 2% rocznym przyroście ilości pojazdów na świecie.

Przypuszcza się, że scenariusz „a”, zakładający 1% wzrost liczby pojazdów, jest bardzo realnym scenariuszem. Dlatego też w kolejnej symulacji uwzględniono taki właśnie roczny przyrost.

Powyżej opisane scenariusze prezentowały czysto teoretyczne przypadki nagłego, całkowitego wycofania z użytku klasycznych silników spalinowych i zastąpienia ich napędami hybrydowymi lub ogniwami paliwowymi. Poniżej, na Rys. 5, przedstawiono płynny proces wycofywania silników konwencjonalnych z rynku przy jednoczesnym zastępowaniu ich nowymi typami napędów. Ponadto, uwzględniono ciągły, 1% roczny wzrost sprawności obu rozpatrywanych typów nowoczesnych napędów hybrydowych oraz na ogniwa paliwowe.

Krzywa 1. na Rys. 5. prezentuje przypadek, gdyby każdego roku w sektorze transportu drogowego przybywało 1% pojazdów napędzanych na ogniwa paliwowe, przy jednoczesnym



1% rocznie przyroście całkowitej liczby pojazdów na świecie. Z kolei krzywa 2 ukazuje sytuację, gdyby każdego roku przybywało 1% pojazdów napędzanych za pomocą napędów hybrydowych, przy 1% rocznie przyroście liczby pojazdów na świecie. Przebiegi obu krzywych różnią się nieznacznie, potwierdzając wcześniej uzyskane rezultaty, że napędy hybrydowe są konkurencyjne wobec napędów na ogniwa paliwowe wykorzystujących reforming wodoru na pokładzie pojazdu. Za pomocą krzywej 3 przedstawiono najbardziej optymistyczny wariant, zakładający, że całkowita liczba pojazdów będzie wzrastała 1% na rok, w tym każdego roku udział zarówno pojazdów hybrydowych jak i pojazdów napędzanych ogniwami paliwowymi będzie wzrastał 1%.

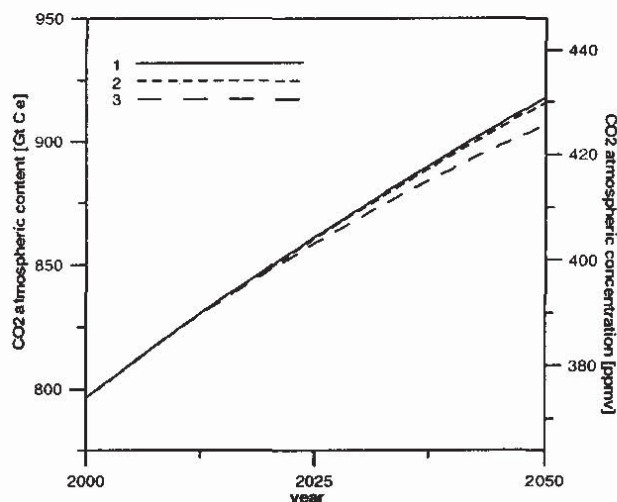


Fig. 5. Atmospheric carbon dioxide content and concentration from 2000 to 2003 and simulations for 2004-2050 period with 1% yearly growth of vehicles number in the world assumption; curve 1-1% yearly increase of fuel cells propulsions in road transport sector at 1% yearly growth of efficiency, curve 2- 1% yearly increase of hybride propulsions in road transport sector at 1% yearly growth of efficiency, curve 3- 1% yearly increase of fuel cells propulsions and 1% yearly increase of hybride propulsions in road transport sector at 1% yearly growth of efficiency, each.

Rys. 5. Zawartość oraz stężenie dwutlenku węgla w atmosferze w latach 2000-2003 oraz symulacje na lata 2004-2050 przy założeniu 1% rocznego przyrostu liczby pojazdów na świecie, gdy: krzywa 1- przyrost udziału w sektorze transportu drogowego napędów na ogniwa paliwowe wynosi 1%/rok przy rocznym wzroście sprawności napędu 1%; krzywa 2- przyrost napędów hybrydowych wynosi 1%/rok przy rocznym wzroście sprawności napędu 1%; krzywa 3- przyrost napędów na ogniwa paliwowe wynosi 1%/rok oraz napędów hybrydowych wynosi 1%/rok przy rocznym wzroście sprawności obu napędów 1%.

Oczekiwane rzeczywiste przyrosty udziału poszczególnych nowoczesnych napędów nie są aż tak wysokie. W najbliższych latach mogą to być ułamki procentów rocznie. Wzrost tego udziału jest natomiast trudny do przewidzenia w ciągu najbliższych dekad. Roczny wzrost sprawności każdego z rozpatrywanych napędów wynosi 1% od wartości początkowej, zakładającej 30% sprawność w roku 2003. Założenie to wydaje się wysoko prawdopodobne w nadchodzących kilku dziesięcioleciach.

## 5. Wnioski

Zaprojektowany model umożliwia dokonywanie zróżnicowanych symulacji komputerowych prognozujących ilość dwutlenku węgla w atmosferze ziemskiej w zależności od wielkości poszczególnych strumieni. W niniejszej pracy analizowano strumień antropogenny spalania paliw kopalnych w sektorze transportu, ze szczególnym uwzględnieniem transportu lądowego. Rozpatrywano różne możliwości redukcji emisji CO<sub>2</sub>, jak przechodzenie z konwencjonalnie zasilanych pojazdów na pojazdy zasilane hybrydowo lub za pośrednictwem ogniwa paliwowych oraz systematyczne zwiększanie sprawności nowoczesnych typów napędów. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono,

że napędy hybrydowe typu SIDI oraz CIDI stanowią konkurencyjne rozwiązanie w stosunku do napędów na ogniwa paliwowe zasilane wodorem pochodzącym z reformingu na pokładzie pojazdu. Zauważono ponadto, że pomimo wdrażania oraz systematycznego usprawniania nowych typów napędów, strumień emisji CO<sub>2</sub> z sektora transportu drogowego będzie wzrastał w kolejnych dziesięcioleciach. Będzie to wynikiem wzrostu liczby pojazdów na świecie, która w roku 2050 może podwoić swą obecną wartość.

Ze względu na trudności w oszacowaniu rzeczywistych trendów w rodzaju oraz tempie rozwoju nowoczesnych napędów, przedstawione w referacie symulacje ograniczone zostały do dość skrajnych przypadków. Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie granic, w których ujęte zostaną rzeczywiste emisje w ciągu kolejnych kilkudziesięciu lat. Po przeanalizowaniu wyników symulacji zakładających dość realne tendencje rozwoju motoryzacji (Rys. 4a oraz Rys. 5), oraz przy założeniu, że emisje z pozostałych sektorów działalności człowieka zachowują swoje dotychczasowe tendencje, można przypuszczać, że w roku 2025 ilość dwutlenku węgla w atmosferze wyniesie ekwiwalentnie ok. 860 Gt węgla co jest równoważnością 410 ppm CO<sub>2</sub>. W roku 2050 można byłoby spodziewać się od 900 do 925 Gt e C, czyli stężenie CO<sub>2</sub> w atmosferze wynosić może pomiędzy 425 a 435 ppm.

## Literatura

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2001: The scientific basis* (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001), p. 89-90.
- [2] Grace J. (2001). Carbon Cycle. University of Edinburgh Academic Press. *Encyclopedia of Biodiversity, Vol. 1, 609-629*
- [3] Schneider S. H. (1997). *Laboratorium Ziemia*, (wyd. 1), Science Masters, Wydawnictwo CiS, Warszawa
- [4] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Kioto 1997
- [5] Energy Information Administration, 2002, *Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2001*. Office of Integrated Analysis and Forecasting, U.S. Department of Energy, Washington DC
- [6] International Energy Agency, 2001, *Key World Energy Statistics from the IEA*
- [7] The Royal Society, 2001, *The Role of Carbon sinks in mitigating global climate change*
- [8] Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Transportation Technologies, Office of Advanced Automotive Technologies, *Fuel Cells for Transportation*, Program Implementation Strategy, U.S. Department of Energy
- [9] Wolański P., Siwiec D., *Emisja dwutlenku węgla w sektorze transportu - porównanie emisji z samochodów napędzanych silnikami klasycznymi z samochodami napędzanymi ogniwami paliwowymi*, XVIII Zjazd Termodynamików, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002
- [10] Marland G., Boden T.A., Andres R.J., 2003, *Global, Regional, and National Fossil Fuel CO<sub>2</sub> Emissions, In Trends: A compendium of Data on Global Change*, Environmental Sciences Division, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy
- [11] Houghton R.A., Hackler J.R., 2002, *Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes. In Trends: A compendium of Data on Global Change*, Environmental Sciences Division, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy
- [12] Takahashi T., Sutherland S. C., Sweeney C., Poisson A., Metzl N., Tilbrook B., Bates N., Wanninkhof R., Feely R., Sabine Ch., Olafsson J., Nojiri Y., *Global sea-air CO<sub>2</sub> flux based on climatological surface ocean pCO<sub>2</sub>, and seasonal biological and temperature effects*, Deep-Sea Research II 49 (2002) 1601-1622, Elsevier Science