Karina Frączek, Jerzy Śleszyński
Uniwersytet Warszawski

PORÓWNANIE WPŁYWU CYKLU ŻYCIA BENZYNY SILNIKOWEJ I BIOETANOLU NA ŚRODOWISKO

Streszczenie

Celem rozważań jest przeprowadzenie porównawczej oceny potencjalnego wpływu na środowisko wywieranego podczas całego cyklu życia wybranych rodzajów paliw samochodowych. Analiza ma posłużyć do weryfikacji hipotezy o niższej uciążliwości dla środowiska odnawialnych biopaliw w porównaniu z nieodnawialnymi paliwami produkowanymi z ropy naftowej. Do oceny wpływu na środowisko wykorzystano metodę Oceny Cyklu Życia (*Life Cycle Assessment*), która bierze pod uwagę szerokie spektrum oddziaływań powstających od pozyskania do spalenia paliwa. Podstawowego porównania paliw dokonano na przykładzie benzyny silnikowej i bioetanolu wykorzystując literaturę przedmiotu i istniejące bazy danych. Ocenę szkodliwości badanych paliw w całym ich cyklu życia rozszerzono o własną ocenę ilościową z wykorzystaniem elementów metody „Eko-wskaźnik 99" zaadaptowanej na potrzeby tego opracowania.

Słowa kluczowe: Ocena Cyklu Życia, Eko-wskaźnik 99.

Kody JEL: Q56, Q57

Wstęp

Przez długi czas badanie oddziaływania gospodarki na środowisko polegało głównie na obserwowaniu i kwantyfikowaniu efektów o charakterze bezpośrednim. Również mechanizmy regulacyjne polityki ochrony środowiska zdawały się ignorować fakty wskazujące na wielowymiarowość, silne rodzajowe zróżnicowanie i rozciągnięcie w czasie zjawisk będących konsekwencją negatywnego wpływu na środowisko. Ten sposób myślenia zakwestionowały i przełamały, stosunkowo niedawno, badania przepływów materialnych między gospodarką a środowiskiem, analizy opisujące procesy gospodarcze w języku ekologii (*industrial ecology*), jak również analizy cyklu życia produktów i procesów gospodarczych.

Kiedy zawodzą tradycyjne metody, to z pomocą technik biorących pod uwagę cały okres życia produktu lub procesu można dokładniej i lepiej przyjrzeć się kluczowym problemom związanym z pozyskiwaniem i eksploatacją zasobów naturalnych, w tym również źródeł energii. Na przykład, od kilku dekad toczą się spory między zwolennikami odnawialnych źródeł energii (OZE) a lobby popierającym konwencjonalne metody czerpania energii z paliw kopalnych (osobną grupę interesu stanowi energetyka atomowa). Z reguły spór pozostaje nierozstrzygnięty, ponieważ oponenci nie mogą porozumieć się w dwóch zasadniczych sprawach.

Po pierwsze, rzecznicy nieodnawialnych źródeł energii wskazują na wciąż wysokie, bezpośrednie koszty wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych przemilczając z kolei wysokie koszty zewnętrzne, które są nieopłaconym kosztem społecznym funkcjonowania energetyki spalającej paliwa kopalne. Po drugie, obrońcy kopalń węgla i szybów nafto-

wych skłonni są wskazywać uciążliwości wynikające z przyłączania i uzależnienia od energii odnawialnej skwapliwie pomijając bardzo długi łańcuch szkodliwych oddziaływań paliw kopalnych, który rozpoczyna się od naruszenia powierzchni ziemi, a kończy szkodami górniczymi i wysokimi kosztami likwidacji kopalni lub szybów.

W przypadku paliw napędzających pojazdy analiza oddziaływania na środowisko narzuca skupienie się przede wszystkim na emisjach zanieczyszczeń, które występują na wszystkich etapach cyklu życia paliw. Pozyskanie surowca do produkcji paliwa, procesy przetwórcze i działania związane z użytkowaniem wymagają nakładów energii, które z kolei są źródłem emisji degradujących środowisko, w tym zdrowie ludzi. Wybierając reprezentantów paliw nieodnawialnych i odnawialnych, w postaci benzyny silnikowej i bioetanolu, można pokusić się o sprawdzenie, czy potwierdzi się stosunkowo popularna hipoteza o mniejszej szkodliwości biopaliw?

Celem rozważań jest przeprowadzenie porównawczej oceny potencjalnego wpływu na środowisko wywieranego podczas całego cyklu życia wybranych rodzajów paliw samochodowych. Analiza ma posłużyć do weryfikacji hipotezy o niższej uciążliwości dla środowiska odnawialnych biopaliw w porównaniu z nieodnawialnymi paliwami produkowanymi z ropy naftowej. Do oceny wpływu na środowiska wykorzystano metodę Oceny Cyklu Życia (*Life Cycle Assessment*), która bierze pod uwagę wielorakie oddziaływania powstającyce od pozyskania do spalenia paliwa. Podstawowego porównania paliw dokonano na przykładzie benzyny silnikowej i bioetanolu. Ocenę szkodliwości badanych paliw w całym ich cyklu życia poparto dostępnymi w literaturze oszacowaniami a następnie rozszerzono o własną ocenę ilościową z wykorzystaniem elementów metody „Eko-wskaźnik 99" zaadaptowanej na potrzeby tego opracowania.

Przedmiot i metoda analizy

Niniejsze opracowanie nie rości sobie prawa do całościowej oceny paliw pod kątem ich wpływu na środowisko. Przedstawia informacje o szkodliwości paliw na podstawie literatury przedmiotu, a następnie konfrontuje je z własną oceną dokonaną za pomocą „Eko-wskaźnika 99". Zawężenie analizy dotyczy przede wszystkim ograniczenia się do dwóch w miarę reprezentatywnych i popularnych paliw. Benzyna silnikowa reprezentuje produkt przemysłu paliwowego wytworzony z ropy naftowej, a więc surowca nieodnawialnego. Z kolei bioetanol jest reprezentantem grupy paliw powstających z przetworzenia biomasy traktowanej jako zasób odnawialny.

Ropa naftowa po wydobyciu i wstępnej obróbce musi zostać przetransportowana do rafinerii, która po przetworzeniu rozprowadza ją na rynku Unii Europejskiej w postaci paliwa. Głównymi produktami rafinerii są: benzyna silnikowa, paliwo lotnicze i olej napędowy. Rafinerie paliwowe w Europie zużywają około 6-7% otrzymanego surowca na wytworzenie energii na własne potrzeby, a rafinerie paliwowo-petrochemiczne zużywają około 10% surowca. W przeprowadzanej analizie brane pod uwagę są jedynie rafinerie petrochemiczne. Nadmiar energii w postaci energii cieplnej wykorzystywany jest w sieciach grzewczych sąsiadujących z rafinerią miast.

Surowiec sprowadzony do rafinerii służy do wytworzenia nie tylko benzyny, ale również innych produktów, jak na przykład nafta czy paliwo diesla. Wymaga to arbitralnego oszacowania potrzeb energetycznych i ilości emisji wydzielonej przy wytwarzaniu poszczególnych produktów. Jest to tylko jeden z przykładów, że podobna analiza wymaga arbitralnych oszacowań, co w konsekwencji może wiązać się z ryzykiem błędu. Jednak z powodu braku danych właśnie taki sposób postępowania zastosowano w dalszej analizie.

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 329 2014-03-06 15:33:22

Występują dwa podstawowe typy biopaliw: biodiesel – przetworzony chemicznie olej roślinny, bioetanol – alkohol etylowy wyprodukowany z roślin w procesie fermentacji i destylacji. Bioetanol nadaje się jako paliwo do pojazdów. Jest płynny w temperaturze pokojowej, więc może być przechowywany tak samo jak paliwa konwencjonalne. Ma wysoką liczbę oktanową, co pozwala na zwiększenie stopnia konwersji, wydajności silnika i jego możliwości. Według krajowej ustawy o biokomponentach i biopaliwach ciekłych (Dziennik Ustaw Nr 169 z 2006 roku, oba rodzaje paliwa mogą być stosowane w stanie czystym w specjalnie do tego celu przystosowanych silnikach.

Wyróżnia się dwie generacje biopaliw, a podziału dokonuje się na podstawie pochodzenia biomasy wykorzystanej do ich produkcji. Bioetanol należy do drugiej generacji biopaliw. Kategoria ta obejmuje, między innymi, celulozowe resztki organiczne (słoma, wierzba energetyczna, miskant), biogaz oraz proces upłynniania biomasy, w którym jest ona najpierw zgazowywana, a gaz następnie wykorzystuje się do produkcji paliwa. Zaletą tej generacji jest wykorzystanie odpadów organicznych w produkcji rolniczej oraz możliwość zagospodarowania nieużytków.

Analiza na bazie Oceny Cyklu Życia (*Life Cycle Assessment* – dalej w tekście nazywaną LCA) została opracowana w latach 60. XX wieku. W tym okresie zaczęto intensywnie poszukiwać sposobów oszczędnego użytkowania energii i systematycznie malejących zasobów surowcowych. Autorem jednej z pierwszych analiz tego rodzaju był Harold Smith, który w 1963 roku na Światowej Konferencji Energetycznej w Melbourne przedstawił swoje obliczenia dotyczące łącznego, gospodarczego zapotrzebowania na energię w produkcji produktów gotowych i półproduktów w przemyśle chemicznym (Kulczycka i in. 2001).

Po kilku dekadach, kiedy badanie LCA wykorzystywano już stosunkowo powszechnie do kompleksowej oceny wpływu na środowisko, pojawiła się potrzeba standaryzacji metodologii. To doprowadziło w latach 1997-2002 do umieszczenia zasad metody LCA w normach Międzynarodowej Organizacji Standaryzacyjnej (International Standards Organization – ISO). Szczegółowe informacje dotyczące certyfikacji znaleźć można w grupie norm ISO 14000: od ISO 14040 do ISO 14049 (na przykład: Kowalski i in. 2007). W roku 2002 Program Środowiskowy Organizacji Narodów Zjednoczonych (United Nations Environmental Programme – UNEP) połączył swoje siły ze Stowarzyszeniem Toksykologii i Chemii Środowiskowej (Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC), co doprowadziło do udoskonalenia i promocji metodologii LCA.

Zgodnie ze swoją nazwą, metoda LCA odnosi się do całego cyklu życia danego procesu lub produktu. Obowiązuje zasada analizy „od kołyski po grób" (w oryginale: „*from the cradle to the grave*"), co oznacza, że badanie dotyczy oceny działań przemysłowych zarówno na wstępnym etapie pozyskiwania z ziemi surowców koniecznych do produkcji, a dalej poprzez stadia pośrednie, aż do finalnych procesów, kiedy zużyte surowce lub produkty (w bardzo różnej postaci) wracają z powrotem do środowiska. Wyodrębnia się cztery podstawowe etapy „cyklu życia" produktu lub procesu:

1. Wydobycie/pozyskanie surowców i ich przerób.
2. Produkcja wyrobów.
3. Dystrybucja, przetwarzanie i wykorzystanie wyrobów.
4. Końcowe zagospodarowanie (recykling, gospodarka odpadami, rekultywacja).

LCA pozwala oszacować skumulowany wpływ danego procesu lub produktu na środowisko uwzględniając wszystkie etapy jego cyklu życia. Z uwagi na swoją szczegółowość analiza ta zapewnia pełny i wszechstronny wgląd w zagadnienia dotyczące wpływu na środowisko procesu produkcji oraz samego produktu. LCA jest również przydatna w formułowaniu celów polityki i narzędzi jej realizacji. Pozwala uniknąć powierzchownych

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 330 2014-03-06 15:33:22

ocen i kierowania uwagi na zdarzenia, które nie są najważniejsze z punktu widzenia negatywnego wpływu na środowisko. Tym samym pomaga przedsiębiorstwom w dokonaniu wyboru bardziej przyjaznej środowisku kompozycji surowców, technologii i metod wytwarzania.

Reasumując, jest to pożyteczna i stosunkowo sformalizowana technika pozwalająca ocenić czynniki i potencjalne skutki związane z produktem, procesem lub usługą mające ujemny wpływ na środowisko. Konstrukcja LCA wymaga określenia granic badanego systemu, w którym wyróżnia się procesy jednostkowe połączone wejściami i wyjściami reprezentującymi łączące procesy przepływy materialne i energetyczne. Wybrane jednostki funkcjonalne mają umożliwić obliczenia i porównania. Jednostka funkcjonalna pozwala określić ilościowo efekty systemu i tworzy wspólny mianownik ocen formułowanych względem produktu lub procesu na kolejnych etapach jego życia. W celu dokonania oceny konieczne jest:

– zgromadzenie informacji na temat energii i zasobów istotnych i niezbędnych w procesie produkcji oraz danych na temat zanieczyszczeń związanych z badanym produktem, procesem lub usługą,
– dokonanie kompleksowej oceny potencjalnego wpływu na środowisko oraz zidentyfikowanie najważniejszych zagrożeń,
– zinterpretowanie wyników, czyli sformułowanie kluczowych wytycznych ułatwiających podjęcie właściwej decyzji zmniejszającej presję wywieraną na środowisko.

LCA może również zostać wykorzystana przy tworzeniu mierników kompleksowej oceny wpływu na środowisko. Jednym z takich rozwiązań jest „Eko-wskaźnik 99" (w oryginale: „*Eco-indicator 99*") – syntetyczny wskaźnik uwzględniający wpływ na ludzkie zdrowie, jakość środowiska, stan zasobów naturalnych (Goedkoop i in. 2000; Goedkoop i in. 2001). Przeprowadzenie oceny wpływu na trzy tak zróżnicowane charakterystyki produktu lub procesu wymaga przedstawienia analizowanych w badaniu wejść i wyjść systemu w tych samych jednostkach W przypadku „Eko-wskaźnika 99" polega to na normalizowaniu ocen i sprowadzeniu ich do wielkości niemianowanych. Prace nad ujednolicaniem metody wyliczania wskaźnika prowadzone są już od wielu lat, czemu towarzyszą raporty i publikacje. Również w polskiej literaturze opisano zastosowanie metody „Eko-wskaźnika 99" do oceny wybranych typów pomp przemysłowych (Lewandowska 2005).

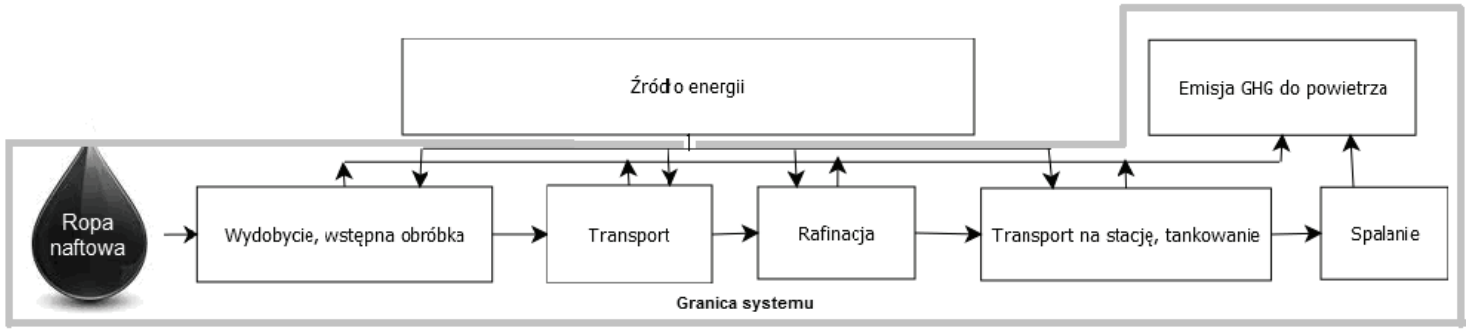
Wpływ cyklu życia paliw na zużycie energii i emisję gazów cieplarnianych

Celem tej części pracy jest przedstawienie porównania potencjalnego wpływu na środowisko powstającego w cyklu życia benzyny silnikowej i bioetanolu. Benzyna silnikowa jest wytwarzana z surowców nieodnawialnych – różnych rodzajów ropy naftowych. Bioetanol powstaje z surowców odnawialnych – różnych typów biomasy. Każde z paliw musi zostać poddane przerobowi, który ma na celu dostosowanie go do wymogów norm paliwowych. Ogół tych procesów od wydobycia aż po zatankowanie do baku samochodowego nosi w żargonie przemysłowym nazwę „*Well-to-Tank*" (WTT). Po zatankowaniu paliwo zostaje poddane procesowi spalania i w ten sposób energia cieplna zmienia się w energię mechaniczną. Etap od zatankowania aż do spalenia nazywany jest „*Tank-to-Wheel*" (TTW).

Powyższe etapy określają zakres systemu przyjętego do analizy (por. rysunek 1 oraz rysunek 2). Oba etapy dotyczą kolejno po sobie następujących procesów, które związane są z pochłanianiem pewnych nakładów oraz powstawaniem, obok właściwego produktu,

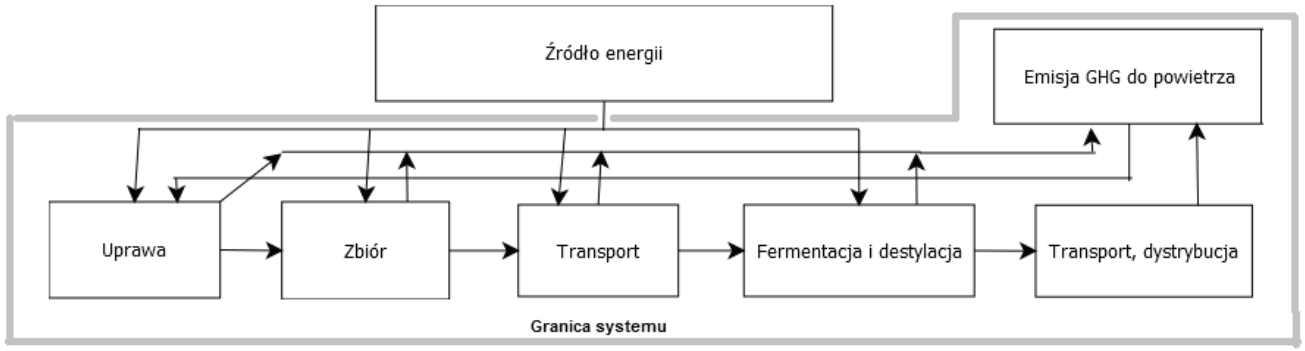
spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 331 2014-03-06 15:33:22

Rysunek 1
Granice systemu w analizie WTT i TTW paliwa kopalnego



Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 2
Granice systemu w analizie WTT i TTW biopaliwa



Źródło: jak w rysunku 1.

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 332 2014-03-06 15:33:22

niekorzystnych dla środowiska produktów ubocznych. W samodzielnym badaniu trudne byłoby zgromadzenie krytycznej masy danych niezbędnych do opisania wszystkich wejść i wyjść składających się na cykl życia. Dlatego podstawą dla zaprezentowanych poniżej rozważań jest raport sporządzony we współpracy Komisji Europejskiej, Concawe oraz RenaultEUCAR w 2011 roku (Edwards i in. 2011a). W raporcie wykorzystano dane dotyczące 27 państw należących do Unii Europejskiej.

Z całą pewnością w praktyce stosowane są różnego rodzaju gatunki ropy naftowej oraz różne procesy technologiczne przerobu tego surowca. Można jednak stwierdzić, że w krajach objętych raportem przeważają nowoczesne i stosunkowo ujednolicone technologie stosowane zgodnie z zasadą BAT (*Best Available Technique*) obowiązującą na terenie Unii Europejskiej. Z takich przesłanek wyszli również autorzy raportu.

W przywoływanej analizie głównymi kryteriami oceny szkodliwości badanego produktu są: ilość pobieranej energii oraz ilość emisji, jaka wiąże się z wydobyciem surowca, jego przerobem i użytkowaniem produktu w pojazdach. Jako jednostki funkcjonalne przyjęto zużycie energii mierzonej w MJ na jednostkę energii wyrażoną w MJ paliwa (w pełni przetworzonego paliwa jako produktu etapu WTT) oraz emisję gCO_2eq na jednostkę energii wyrażoną w MJ gotowego paliwa[1].

Jednostki funkcjonalne odnoszą się zatem do dwóch rodzajów negatywnych skutków:
– ilość energii zużytej w procesie przedstawiona jest w jednostkach MJ i odnosi się również do wytworzenia jednego MJ paliwa[2],
– wyemitowana ilość gazów cieplarnianych (GHG), a ilość ta przedstawiana jest w odniesieniu do wytworzenia jednego MJ paliwa.

Tabela 1

Zestawienie zapotrzebowania na energię oraz emisji GHG w całym cyklu życia benzyny oraz biopaliwa pochodzącego z różnych surowców

Paliwo	WTT		TTW	Emisja całkowita
	Zużycie energii MJ/MJ	Emisja GHG gCO_2eq/MJ	Emisja GHG gCO_2eq/MJ	
Benzyna	0,168	13,6	73,38	86,98
Etanol (burak cukrowy ze sprzedażą prod. ubocznych)	1,20	-38,58	71,38	32,8
Etanol (burak cukrowy z wykorzystaniem prod. ubocznych)	0,89	-47,98		23,40
Etanol (pszenica, bojler podgrzewany gazem ziemnym)	1,21	-24,88		46,50
Etanol (pszenica z wykorzystaniem turbiny z generatorem pary)	0,96	-32,48		38,90
Etanol (pszenica, bojler podgrzewany węglem brunatnym)	1.04	-14.18		57.2
Etanol (pszenica, bojler podgrzewany słomą)	0.84	-45.48		25.9

Źródło: Edwards i in. (2011a); Edwards i in. (2011b).

Z raportu wynika, że na etapie WTT w przypadku biopaliwa ilość CO_2 pochłoniętego przez biomasę w trakcie jej życia biologicznego jest większa od emisji GHG w trakcie

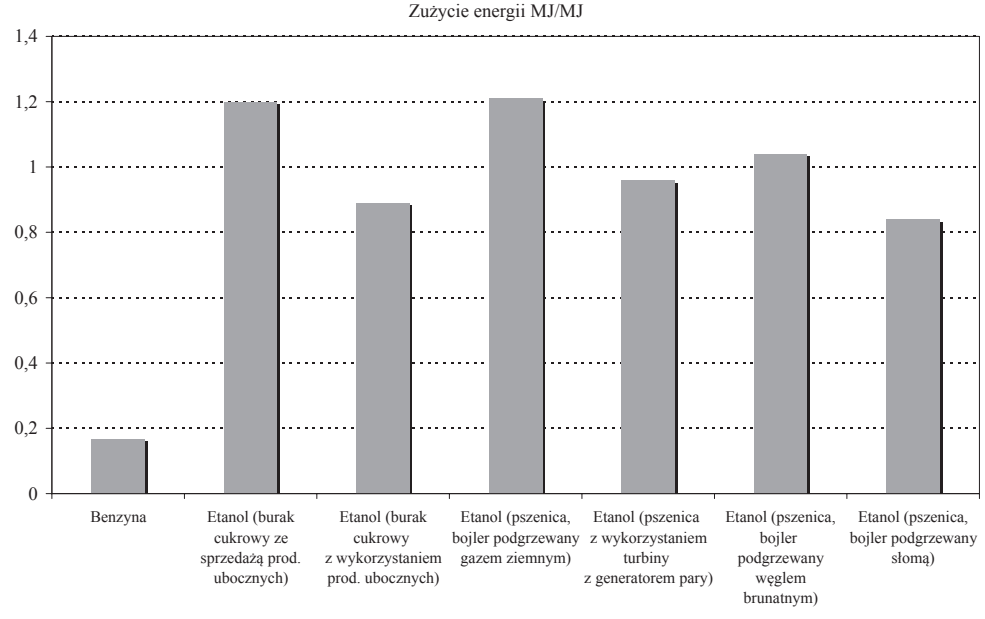
[1] Ekwiwalent CO_2 (CO_2eq) można opisać jako ilość dwutlenku węgla, która posiada ten sam potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, co 1 tona danego gazu cieplarnianego.
[2] Mega dżul [MJ] = 1000 dżuli [J].

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 333 2014-03-06 15:33:22

przetwarzania biomasy w bioetanol. Wyznaczając emisje GHG na etapie TTW przyjęto, że nie są one zależne od rodzaju biomasy. W tabeli 1 sporządzono zestawienie zapotrzebowania na energię oraz emisji GHG dla benzyny i różnych technologii otrzymywania bioetanolu. Do obliczeń „Eko-wskaźnika 99", w następnej części artykułu, wzięto wartości średnie dla sześciu metod produkcji bioetanolu.

W przypadku zapotrzebowania na energię ocena jest korzystna dla benzyny (por. wykres 1), ponieważ ilość energii, której potrzeba do jej wytworzenia jest wielokrotnie mniejsza niż w przypadku biomasy. Jest to spowodowane tym, że przetworzenie ropy naftowej w celu wytworzenia benzyny silnikowej wymaga przede wszystkim wydzielenia frakcji benzynowej z ropy na drodze destylacji i jej oczyszczenia, a są to procesy o stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na energię.

Wykres 1
Porównanie paliw w całym cyklu życia pod względem zapotrzebowania na energię

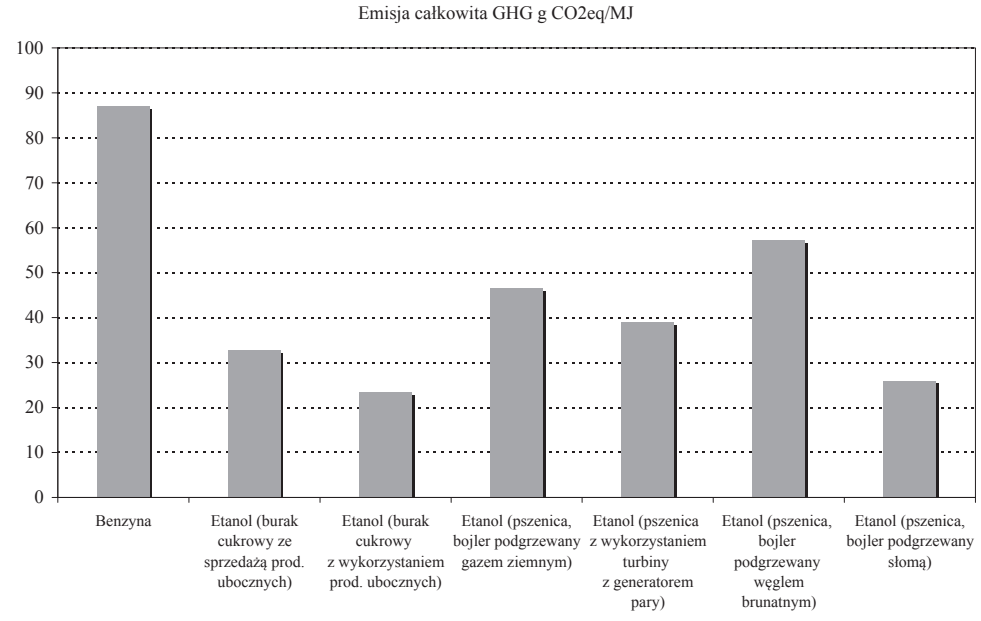


Źródło: Edwards i in. (2011a).

Biomasa w swoim cyklu życia wypada zdecydowanie lepiej od benzyny w kwestii ograniczenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery, co pokazuje wykres 2. Na etapie WTT ilość przedostających się do ekosystemu gazów cieplarnianych, co spowodowane jest intensywnym nawożeniem, jest dla biopaliw wielkością znaczącą. Jednak głównym atutem biomasy jest fakt, że z jej powstaniem łączy się pobranie z atmosfery dużej ilości CO_2. Na etapie TTW ilość spalin wydobywających się z rur wydechowych na jeden MJ spalonego paliwa w przypadku benzyny różni się tylko o 2 gCO2eq od ilości gazów emitowanych w wyniku spalania bioetanolu. W efekcie bilans emisji porównywanych paliw w całym cyklu życia jest niekorzystny dla benzyny.

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 334 2014-03-06 15:33:23

Wykres 2
Porównanie paliw w całym cyklu życia pod względem emisji gazów cieplarnianych



Źródło: Edwards i in. (2011a); Edwards i in. (2011b).

Spośród wszystkich opisanych w raporcie metod otrzymywania etanolu prym w ograniczaniu emisji wiodą te, w których wykorzystuje się substancje odpadowe. Powód wyższości tych metod jest bardzo prosty i łatwy do wytłumaczenia. Stosując substancje odpadowe do pozyskiwania energii, ograniczamy zapotrzebowanie na paliwa i energię z zewnątrz, utylizując przy tym swoje odpady.

Ocena wpływu na środowisko w oparciu o metodę „Eko-wskaźnika 99"

Ostatnim etapem porównania paliw jest przeprowadzenie oceny wpływu procesów związanych z benzyną silnikową i bioetanolem na środowisko z wykorzystaniem „Eko-wskaźnika 99". Metoda ta pozwala na oszacowanie wpływu całego cyklu życia na środowisko naturalne. Polega ona na określeniu stopnia szkodliwości analizowanych produktów lub procesów za pomocą znormalizowanych ocen punktowych – im wyższa ocena punktowa, tym bardziej negatywna ocena. Mierzone oddziaływanie dotyczących trzech obszarów:
– ludzkie zdrowie,
– jakość ekosystemu,
– wpływ na zmniejszenie zasobów naturalnych.

W tabeli 2 wymieniono obszary analizowanych oddziaływań podając jednostki pomiaru oraz ich krótką charakterystykę. W celu przekształcenia danych dostarczonych przez analizę LCA we wskaźniki podejmuje się następujące decyzje i działania:

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 335 2014-03-06 15:33:23

– wybór tak zwanych kategorii wpływu, przy czym zazwyczaj w badaniach stosuje się standardowe kategorie wpływu, a ich wybór powinien być zgodny z celem i zakresem konkretnego badania,
– klasyfikowanie, czyli przypisanie wyników LCA poszczególnym kategoriom wpływu,
– charakteryzowanie, czyli obliczanie wartości wskaźnika dla danej kategorii wpływu.

Tabela 2

Obszary badanego wpływu wchodzące w skład „Eko-wskaźnika 99" z odpowiadającymi im jednostkami i objaśnieniami

Obszar	Jednostka	Opis
Negatywny wpływ na ludzkie zdrowie	DALY	Lata życia skorygowane niesprawnością (DALY – *disability adjusted life-years*) pozwalają określić względne skrócenie czasu życia ludzkiego spowodowane szkodliwymi oddziaływaniami.
Negatywny wpływ na jakość ekosystemu	PAF*m^2*rok	Wpływ na określone gatunki roślin (PAF – *potentially affected fraction*) na poszczególnych obszarach środowiska.
	PDF*m^2*rok	Procent gatunków zanikających (PDF – *potentially disappeared fraction*) na danym obszarze wskutek oddziaływania na środowisko (PDF=PAF/10).
Zmniejszenie zasobów naturalnych	MJ	Oceniane jest poprzez dostępność pozostałych do wydobycia surowców mineralnych, w tym paliw kopalnych. Dostępność jest określona przez konieczne zwiększenie zużycie energii (Mt/t) na eksploatację tych zasobów.

Źródło: Kowalski i in. (2007).

Uzyskane wyniki są normalizowane, a ich znaczenie dla poszczególnych kategorii zostaje zaznaczone poprzez przypisanie im określonych wag. Normalizacja polega na odniesieniu wartości wskaźnika kategorii w stosunku do pewnej wartości bazowej. W praktyce jest to podzielenie obserwowanej wartości wskaźnika przez normującą wartość, którą zazwyczaj jest uśredniona wartość oddziaływania w danym obszarze. Normujące wartości oddziaływania w odniesieniu do ocenianych obszarów i wytypowanych kategorii wpływu są dostępne w kilku wariantach w postaci średnich dla Europy (Goedkoop i in. 2000; Goedkoop i in. 2001). Normalizacja pozwala na uzyskanie wyników bezwymiarowych i jest podstawą dalszych działań, w tym ustalenia i zastosowania wag. W realizowanej tutaj analizie wykorzystane dane dotyczą wyłącznie obszaru Europy, w perspektywie czasowej do roku 2020.

W tabeli 3 przedstawiono końcowe etapy obliczeń i wyliczone wskaźniki. Kompletna i rozległa analiza znajduje się w niepublikowanej pracy (Frączek 2012). Porównanie „Eko-wskaźnika 99", dla obu analizowanych paliw, bierze pod uwagę dostępne dane odnoszące się do ich cyklu życia na etapie WTT. W dalszych obliczeniach występują wagi wynikające z następującej oceny znaczenia oddziaływań na trzy rozważane obszary: ludzkie zdrowie 40%, jakość ekosystemu 40%, zasoby 20%. Arbitralnie przyjęto, że wpływ na ludzkie zdrowie oraz wpływ na ekosystem są tak samo ważne, ale dwukrotnie ważniejsze od wpływu na stan zasobów. Przyjęcie innej oceny ważności musi skutkować, poprzez system wag, zmianą ostatecznej wartości wskaźnika. Decydujące jest zatem porównanie ocen obu paliw opisujących szkodliwy wpływ, a nie interpretowanie wartości samego wskaźnika.

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 336 2014-03-06 15:33:23

Z uwagi na złożoność kategorii oddziaływania oraz ograniczony zakres przeprowadzonej analizy, niektóre wartości były niepewne lub niedostępne. Z tego powodu zaprezentowane dalej końcowe obliczenia pomijają pewne elementy. W tabeli 3 nie uwzględniono na przykład wpływu na ludzkie zdrowie z powodu rakotwórczości, promieniowania i zubożenia warstwy ozonowej. Jakość ekosystemu nie bierze pod uwagę ekotoksyczności. Zużycie zasobów nie bierze pod uwagę zużywania surowców mineralnych.

Tabela 3
Obliczenia „Eko-wskaźnika 99"

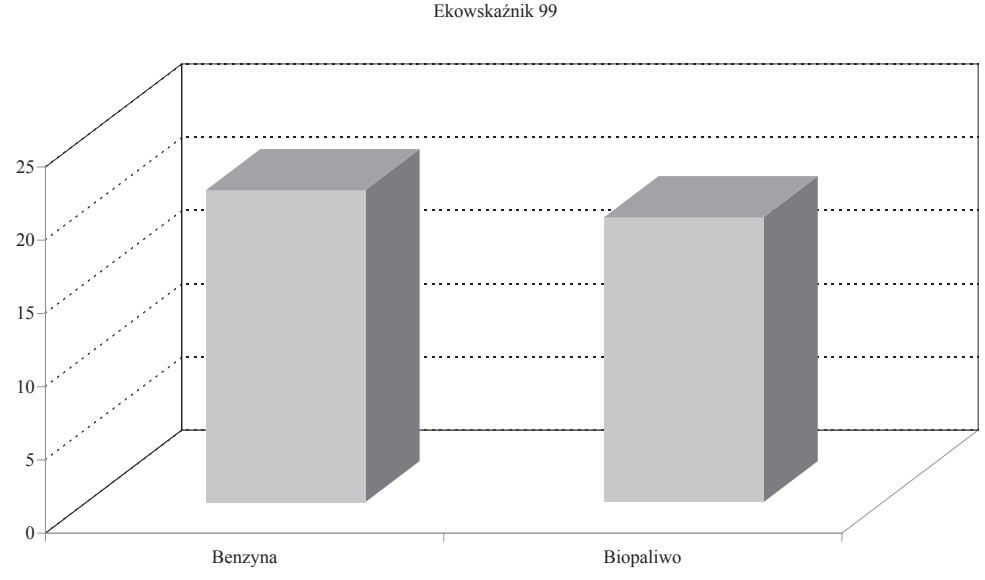
Obszary wpływu	Wagi	Kategorie wpływu	Jednostki	Skorygowane dane pierwotne	
				BENZYNA	BIOETANOL
Ludzkie zdrowie	40	Wpływ na układ oddechowy (substancje nieorganiczne)	DALY	0,023093	0,425664
		Wpływ na układ oddechowy (substancje organiczne)		0,000742	0
		Zmiany klimatu		0,139	0,706
Jakość ekosystemu	40	Zakwaszenie, eutrofizacja	PDF*m^2*rok	2528,3	54816
		Zmiana formy użytkowania terenu		bd	2,53E+11
Zasoby	20	Paliwa kopalne	MJ	1,81E+12	0
				Wartości po normalizacji	
				BENZYNA	BIOETANOL
Ludzkie zdrowie	40	Wpływ na układ oddechowy (substancje nieorganiczne)	DALY	1,79E-02	4,20E-01
		Wpływ na układ oddechowy (substancje organiczne)		4,29E-08	0
		Zmiany klimatu		6,09E-07	1,01E-05
Jakość ekosystemu	40	Zakwaszenie, eutrofizacja	PDF*m^2*rok	4,66E-08	7,43772E-07
		Zmiana formy użytkowania terenu		bd	1,69E-01
Zasoby	20	Paliwa kopalne	MJ	1,03E+00	0
				Wartości po ważeniu	
				BENZYNA	BIOETANOL
Ludzkie zdrowie	40	Wpływ na układ oddechowy (substancje nieorganiczne)	DALY	7,17E-01	16,7808
		Wpływ na układ oddechowy (substancje organiczne)		1,76E-06	0
		Zmiany klimatu		2,44E-05	4,06E-04
Jakość ekosystemu	40	Zakwaszenie, eutrofizacja	PDF*m^2*rok	1,86E-06	2,98E-05
		Zmiana formy użytkowania terenu		bd	2,66
Zasoby	20	Paliwa kopalne	MJ	2,06E+01	0
„EKO-WSKAŹNIK 99"				21,30	19,45

Źródło: obliczenia i opracowanie własne na podstawie: Edwards i in. (2011a); Edwards i in. (2011b); Goedkoop i in. (2001); Report No.466 2011.

Należy podkreślić, że wyznaczając „Eko-wskaźnik 99" przyjęto najbardziej niekorzystne warunki produkcji benzyny silnikowej ze źródeł niekonwencjonalnych. Oznacza to, że zużycie energii jest wówczas prawie pięć razy wyższe niż w przypadku surowców konwencjonalnych. Natomiast zastosowane dane dotyczące bioetanolu dotyczą sytuacji, w której poziom produkcji gwarantuje 10% udział bioetanolu w całkowitej produkcji benzyny silnikowej w Unii Europejskiej. Z kolei określenie wag dla poszczególnych badanych obszarów wpływu jest zabiegiem arbitralnym i należy go łączyć z przesłankami subiektywnymi, jakkolwiek może być również poparte wskazówkami zawartymi w politycznych programach rozwoju społeczno-gospodarczego.

Uzyskane wartości „Eko-wskaźnika 99" wskazują, że negatywny wpływ benzyny silnikowej (21,30 punktów) na środowisko jest większy, niż w przypadku bioetanolu (19,45 punktów). Gdyby zrezygnowano z zastosowania wag, jak to przedstawiono na wykresie 3, porównanie uzyskanych ocen byłoby jeszcze bardziej niekorzystna dla benzyny: wpływ benzyny silnikowej (1,05 punktów), wpływ bioetanolu (0,49 punktów).

Wykres 3
Wartość „Eko-wskaźnika 99" (bez wag) dla dwóch porównywanych paliw



Źródło: opracowanie własne na podstawie: Edwards i in. (2011a); Edwards i in. (2011b); Report No.466 2011.

Różnica ocen paliw wynika stąd, że zastosowany wskaźnik uwzględnia zmiany, które wynikną w przypadku konieczności sięgnięcia po niekonwencjonalne źródła ropy naftowej. Świadczy o tym fakt, że najwyższy udział w ocenie wpływu benzyny silnikowej ma znormalizowany współczynnik z tytułu zubożenia zasobów.

Benzyna silnikowa wywiera najbardziej negatywny wpływ na zmniejszenie zasobów naturalnych (znormalizowany współczynnik szkodliwości z tytułu zubożenia zasobów

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 338 2014-03-06 15:33:23

jest równy 1,03 punktów). Natomiast najbardziej szkodliwy wpływ na ekosystem oraz na jakość ekosystemu mają emisje substancji nieorganicznych z powodu przekształcania sposobu użytkowania powierzchni ziemi. Znormalizowany współczynnik szkodliwości z tytułu wpływu substancji nieorganicznych na układ oddechowy wynosi 0,420 punktów. W znacznej mierze zależy od metody uprawy i związanej z nią emisji NOx. Znormalizowany współczynnik szkodliwości z tytułu zmiany sposobu użytkowania terenu równa się 0,169 punktów.

Biorąc pod uwagę dostępne dane na temat cyklu życia benzyny silnikowej i bioetanolu, przedstawione porównanie obu wymienionych paliw, a także na bazie metody „Eko-wskaźnika 99", można wyciągnąć kilka wniosków na przyszłość. Obecnie koszty wytwarzania biopaliwa są znacznie wyższe od kosztów paliwa konwencjonalnego. Jednakże w miarę wyczerpywania się zasobów paliw konwencjonalnych i konieczności oparcia się w produkcji benzyny silnikowej na surowcach niekonwencjonalnych wzrastać będą koszty i negatywne wskaźniki oddziaływania na środowisko produkcji benzyny silnikowej, co spowoduje poprawę pozycji ekonomicznej biopaliw. Należy jednak zaznaczyć, że rozwój produkcji bioetanolu na podstawie biomasy pierwszej generacji jest w naturalny sposób ograniczony, o czym świadczy wysoka wartość współczynnika szkodliwości bioetanolu z tytułu zmiany użytkowania terenu.

Podsumowanie

Analiza cyklu życia benzyny silnikowej wytwarzanej z surowca konwencjonalnego i bioetanolu wytwarzanego z biomasy pierwszej generacji pozwala na następujące stwierdzenia:

– benzyna silnikowa produkowana z konwencjonalnej ropy naftowej charakteryzuje się kilkakrotnie niższym zużyciem energii niż bioetanol,
– bioetanol natomiast, w stosunku do benzyny silnikowej, charakteryzuje się znacznie niższą emisją takich gazów cieplarnianych, jak CO_2 i SOx, ale wyższą emisją NOx.

Produkt będący nośnikiem energii wymaga w całym swoim cyklu życia sporego nakładu energii. Odnawialny charakter surowca, z którego powstaje bioetanol nie może usunąć tej niedogodności. To proste spostrzeżenie wyjaśnia, między innymi, dlaczego ze względu na dostępność konwencjonalnej ropy naftowej obserwuje się stosunkowo ograniczone zainteresowanie rozwojem produkcji bioetanolu.

W celu wskaźnikowego porównania wielkości wpływu cyklu życia benzyny silnikowej i bioetanolu na środowisko posłużono się „Eko-wskaźnikiem 99" i stosując wagi preferujące ludzkie zdrowie i stan środowiska przyrodniczego uzyskano następujące oceny:

– 21,30 punktów dla benzyny silnikowej,
– 19,45 punktów dla bioetanolu.

Przeprowadzone oszacowanie wielkości wpływu cyklu życia benzyny silnikowej i bioetanolu na środowisko naturalne z wykorzystaniem „Eko-wskaźnika 99" ma charakter niepełny oraz wymaga dokładniejszego opracowania etapu WTT i uwzględnienia etapu TTW. To oczywiste, że syntetyczny wskaźnik, taki jak zastosowany w tym badaniu, cechuje się wieloma uproszczeniami i arbitralnymi rozstrzygnięciami. Dopiero pogłębiona analiza baz danych i większa liczba oszacowań mogłaby zwiększyć jego wiarygodność i pewność wnioskowania. Przewidywanie na podstawie wyników punktowych „Eko-wskaźnika 99" nie bierze pod uwagę postępu naukowo-technicznego oraz decyzji o charakterze politycznym i strategicznym, które z pewnością będą podejmowanych w przyszłości.

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 339 2014-03-06 15:33:23

Tym niemniej, analiza składowych rachunku wskaźnika wskazuje na interesujące fakty, których znaczenie wykracza poza ocenę oddziaływania na środowisko:

– konieczność podjęcia na dużą skalę, w najbliższej przyszłości, produkcji benzyny silnikowej z niekonwencjonalnych surowców (ciężka ropa, ewentualnie ropa z piasków roponośnych) spowoduje blisko pięciokrotne zwiększenie zużycia energii w procesie jej wytwarzania;
– możliwości rozwoju produkcji bioetanolu z biomasy pierwszej generacji (pszenica, buraki cukrowe) są bardzo ograniczone ze względu na związane z tym zmniejszenie terenów wykorzystywanych do produkcji żywności;
– rolnictwo intensywne, również roślin przydatnych do produkcji energii, korzysta z dużej ilości substancji nawożących i w efekcie w znacznym stopniu wpływa na ekosystem.

W nieodległej przyszłości można spodziewać się wystąpienia dwóch tendencji. W rezultacie wzrostu kosztów wytwarzania benzyny silnikowej znacząco zwiększy się zainteresowanie rozwojem produkcji bioetanolu z biomasy pierwszej generacji oraz wzrośnie zainteresowanie opanowaniem nowych technologii produkcji bioetanolu z biomasy drugiej generacji (celulozowe resztki organiczne). Jednakże wysoka wartość współczynnika szkodliwości z tytułu zmiany użytkowania terenu zdaje się sugerować, że pojawią się powody do ograniczanie rozwoju produkcji bioetanolu z biomasy pierwszej generacji. Biorąc powyższe pod uwagę, osiągnięcie w 2020 roku celu udziału bioetanolu w produkcji benzyny silnikowej na poziomie 10% będzie prawdopodobnie trudne lub wręcz niemożliwe bez wykorzystania w znacznie większym stopniu bioetanolu z biomasy drugiej generacji.

Porównanie wpływu cyklu życia benzyny silnikowej i bioetanolu na środowisko

Bibliografia

Biello D. (2011), *Złudne obietnice*, "Scientific American", No. 9.

Birath K. (2011), *Ponad 400 autobusów na etanol w Sztokholmie (Szwecja)*,

http://www.eltis.org/index.php?id=13&lang1=pl&study_id=2575 [dostęp: 09.06.2012].

Dziennik Ustaw Nr 169 (2006), Ustawa z dnia 25 sierpnia 2006 r. o biokomponentach i biopaliwach ciekłych.

Edwards R. i in. (2011a), *Well–to–Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European context, Well–to–Tank Report*, http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu.about-jec/files/documents/wtw3_wtw_report_eurformat.pdf [dostęp: 09.02.2012].

Edwards R. i in. (2011b), *Well-to-Wheel Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European context, Tank-to-Wheel Report,* http://ies.jrc.ec.europa.eu/uploads/media/V3.1%20TTW%20Report%2007102008.pdf [dostęp: 09.04.2012].

Frączek K. (2012), *Analiza cyklu życia paliw konwencjonalnych i biopaliw na przykładzie benzyny silnikowej i bioetanolu*, Uniwersytet Warszawski, Wydział Nauk Ekonomicznych, Warszawa.

Goedkoop M. i in. (2000), *The Eco- indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report*. PRé Consultants B.V., Amersfoort.

Goedkoop M. i in. (2001), *The Eco- indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Annex*. PRé Consultants B.V., Amersfoort.

Kowalski Z. i in. (2007), *Ekologiczna ocena cyklu życia procesów wytwórczych (LCA)*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kulczycka J. i in. (2001), *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego*, IGSMiE PAN, Kraków.

Lewandowska A. (2005), *Środowiskowa ocena cyklu życia produktu na przykładzie wybranych typów pomp przemysłowych*, Wydawnictwo AE w Krakowie, Kraków.

Life Cycle Assessment: Principles and practice. Scientific Applications International Corporation (2006), http://www.cs.ucsb.edu /~chong/290N-W10/EPAonLCA2006.pdf [dostęp: 14.11.2011].

Report No.466 (2011), *Environmental performance in the E&P industry 2010 data*, http://www.ogp.org.uk/pubs/466.pdf [dostęp: 09.04.2012].

Rogowska D. (2011), *Wybrane zagadnienia emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia bioetanolu,* „Przemysł Chemiczny", tom 90, nr 10.

Environmental Life Cycle Assessment of Motor Petrol and Bioethanol

Summary

The paper is aimed at a comparative analysis of the impact on the environment exerted by the selected and different types of automotive fuels. They are analysed in their entire life cycle. It should help to verify one hypothesis that renewable biofuels are less harmful to the environment in comparison with non-renewable fuels produced from oil. Life Cycle method was applied to assess the wide spectrum of impacts generated from "the cradle to the grave" of two selected fuels: motor petrol and bioethanol. The initial comparison related to bioethanol with motor petrol and was done with the help of widely available studies and data base. This general evaluation was supplemented by our own quantitative assessment which adopted "Eco-indicator 99" for our comparison study.

Key words: life cycle assessment, Eco-indicator 99.

JEL codes: Q56, Q57

Сравнение влияния цикла жизни моторного бензина и биоэтанола на окружающую среду

Резюме

Цель рассуждений – провести сравнительную оценку потенциального влияния на окружающую среду, оказываемого на протяжении всего цикла жизни избранных видов автотоплива. Анализ призван послужить верификации гипотезы о более низкой обременительности для среды со стороны возобновляемых биотоплив по сравнению с невозобновляемыми топливами, производимыми из нефти. Для оценки влияния на среду использовали метод оценки цикла жизни (англ. *life cycle assessment*), который учитывает широкий спектр воздействия, возникающего с момента добычи до сжигания топлива. Основное сопоставление топлив провели на примере моторного бензина и биоэтанола, используя литературу предмета

и существующие базы данных. Оценку вредности исследуемых топлив во всем их жизненном цикле расширили за счет собственной количественной оценки с использованием элементов метода «Экопоказатель 99», адаптированного для нужд данной разработки.

Ключевые слова: оценка цикла жизни, экопоказатель 99.

Коды JEL: Q56, Q57

© All rights reserved

spec_Szczecin_2013_KRYK_t-1.indd 342 2014-03-06 15:33:24