



Ocena wpływu wzbogacania węgla na obciążenie środowiska naturalnego metodą analizy cyklu życia

Assessment of the effects of coal upgrading on the charge of the natural environment using the LCA method

Jerzy SABLİK¹⁾, Krystyna CZAPLICKA²⁾, Małgorzata BOJARSKA-KRAUS³⁾, Henryk ALEKSA⁴⁾

¹⁾Prof. dr hab.; Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; tel. (+48-32) 259 22 85, e-mail: jsablik@gig.katowice.pl

²⁾Doc. dr hab. inż.; Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; tel. (+48-32) 259 24 20, e-mail: dsxkc@gig.katowice.pl

³⁾Mgr inż.; Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; tel. (+48-32) 259 26 38, e-mail: bmxmbk@gig.katowice.pl

⁴⁾Dr inż.; Główny Instytut Górnictwa, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice; tel. (+48-32) 259 22 81, e-mail: suxha@gig.katowice.pl

RECENZENCI: Ing. Vladimir KOČI, PhD; dr Joanna KULCZYCKA

Streszczenie

Scharakteryzowano cztery modelowe technologie przeróbki węgla w celu oceny wpływu procesu wzbogacania węgla na środowisko naturalne. Wykorzystując LCA (wg normy PN EN 14 040) z zastosowaniem metody ekowskaźnika 99, obliczono obciążenie środowiska naturalnego dla każdego modelu wzbogacania, uwzględniając podstawowe kategorie wpływu, to jest zdrowie człowieka, jakość ekosystemu i zasoby naturalne. Aby obliczyć wartości ekowskaźników opracowano tzw. procesowe drzewo życia dla analizowanych technologii oraz tablice inwentaryzacyjne gromadzące niezbędne dane umożliwiające obliczenia. Jako technologiczną jednostkę funkcjonalną w prowadzonych analizach przyjęto wielkość równą 1000 Mg wzbogacanego węgla. Analiza wielkości obliczonych ekowskaźników wykazała, że największe obciążenia środowiska, jako skutek wzbogacania węgla, występuje w kategorii „zasoby naturalne”, zaś najmniejsze powoduje stosowanie technologii oznaczonej symbolem M1.

Słowa kluczowe: wzbogacanie węgla, ekowskaźnik, ocena cyklu życia (LCA), metodologia

1. Wprowadzenie

W drugiej połowie XX wieku nastąpił gwałtowny wzrost zapotrzebowania na energię, a co za tym idzie na węgiel, gdyż w wielu krajach, także w tych rozwiniętych, podstawowym nośnikiem energii pierwotnej był i nadal pozostaje węgiel. W Polsce około 96% energii uzyskuje się z węgla, w Afryce Południowej — 88%, w Indiach — 77%, w Chinach — 85%, w Australii — 77%, a w USA 56%. Niekontrolowana z punktu widzenia ekologicznego utylizacja węgla w różnych sektorach gospodarki prowadzi do niedopuszczalnego skażenia środowiska naturalnego. W latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia skażenie to osiągnęło taki poziom, że koniecznym

Summary

Four model technologies of coal preparation have been characterised with the aim to evaluate the effects of coal preparation on the natural environment. Using the LCA method (in accordance with the PN EN 14040 standard) the charge of the natural environment has been calculated for each of the cleaning models, taking into account principal categories of the effects, that is human health, quality of the ecosystem and natural resources. With the aim to calculate the eco- indexes, the so- called process tree has been developed for the analysed technologies, as well as the inventory tables that collect necessary data to make the computations possible. As a functional technological unit in the analyses performed, an amount of 1000 Mg of cleaned coal has been assumed. An analysis of the values of calculated eco- indexes has shown that the highest charge of the environment, as a consequence of coal preparation, takes place in the “mineral resources” category, while the lowest one results in using the technology marked M1.

Keywords: coal preparation, eco-indicator, life-cycle assessment (LCA), methodology

1. Introduction

In the second half of the 20th century, a sudden rise in the energy demand took place, and, consequently, in coal, as in many countries, also developed ones, the main energy carrier still has been coal. In Poland about 96%, South Africa — 88%, India — 77%, China — 85%, Australia — 77% are obtained from coal, while in the USA 56%. The non- controlled, from the point of view of ecology, utilisation of coal in various sectors of economy leads to inadmissible pollution of the natural environment. In the seventies of the last century, this pollution had reached such a level that it was found

stało się przeciwdziałanie ujemnym skutkom spalania węgla lub zaprzestanie stosowania węgla do produkcji energii. Pierwszy program zapobiegania skażeniom środowiska naturalnego powodowanym utylizacją węgla w procesach produkcji energii pod nazwą „technologia czystego węgla” (clean coal technology-CCT) opracowany został w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej, a następnie w innych krajach wykorzystujących węgiel do produkcji energii. Efektem realizacji programu „czysty węgiel” było opracowanie dużej liczby nowych technologii utylizacji węgla, wdrożenie których spowodowało, że węgiel uznać można było za paliwo przyjazne środowisku naturalnemu [Sablik 1991, 2002]. Prace, których celem była poprawa jakości węgla jako paliwa energetycznego prowadzone były także w Polsce (np. Ściążko i Dreszer 1995, Białecka 1999). Ważnym elementem technologii czystego węgla jest umiejętność oceny obciążenia środowiska naturalnego powodowanego realizacją określonego procesu przemysłowego. Oceny takiej można dokonać wykorzystując technikę oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment-LCA) [SETAC Brochure 1993, Kulczycka 2001, Czaplicka 2002].

W artykule przedstawiono charakterystyki czterech modeli technologii wzbogacania węgla stosowanych w krajowym przemyśle. Wykorzystując zgromadzone w ten sposób dane oraz technikę oceny cyklu życia dokonano analizy wpływu tych technologii na obciążenie środowiska naturalnego w kategoriach zdrowie człowieka, jakość ekosystemu i zasoby naturalne.

2. Charakterystyka analizowanych technologii wzbogacania węgla techniką LCA

Scharakteryzowano cztery, stosowane stosunkowo często w praktyce przemysłowej, modele technologii wzbogacania węgla, które oznaczono symbolami M1, M2/50, M2/G oraz M3.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy technologii M1, która przewiduje wzbogacanie węgla w zakresie 200–20(10) mm oraz kruszenie całości koncentratu 200–20(10) mm. Podstawowe operacje technologiczne obejmują przygotowanie węgla i wydzielenie zanieczyszczeń z urobku, dwuproduktowe wzbogacanie węgla grubego w separatorach DISA lub osadzarkach, odwodnienie mechaniczne produktów wzbogacania, kruszenie całości koncentratu gruboziarnistego do klasy 20(10) mm oraz mieszanie z miałem surowym i odwodnionym mułem. Tak uzyskany produkt stanowi sortyment handlowy, a jego charakterystykę technologiczną zamieszczono na rys. 1. Należy zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku stosowania w danych warunkach modelu M1 zawartość popiołu w koncentracie wyniesie 18,1%,

necessary either to counteract these negative effects of coal burning or to stop using coal for energy production. The first program of preventing pollution of the natural environment due to utilising coal in the energy production processes, named "clean coal technology" (CCT) was first developed in the United States of America, and, consequently, in other countries that utilise coal for production of energy. The execution of the "Clean Coal Program" had resulted in a great number of coal utilisation technologies, which, when implemented, provided grounds to classify coal as an environment-friendly fuel [Sablik 1991, 2002]. The projects aimed at improving the quality of coal as an energy fuel had also been conducted in Poland (e.g. Ściążko and Dreszer 1995, Białecka 1999). An important element of the clean coal technology is the ability to evaluate the charge of the natural environment, resulting from the execution of a specified industrial process. Such evaluation can be done using the Life Cycle Assessment (LCA) method [SETAC Brochure 1993, Kulczycka 2001, Czaplicka 2002].

The paper presents the characteristics of four model technologies for coal upgrading which are used in the national industries. By using the data collected in such a way, together with the LCA technique, an effect of these technologies on the natural environment has been evaluated in terms of human health, quality of the ecosystem and natural resources.

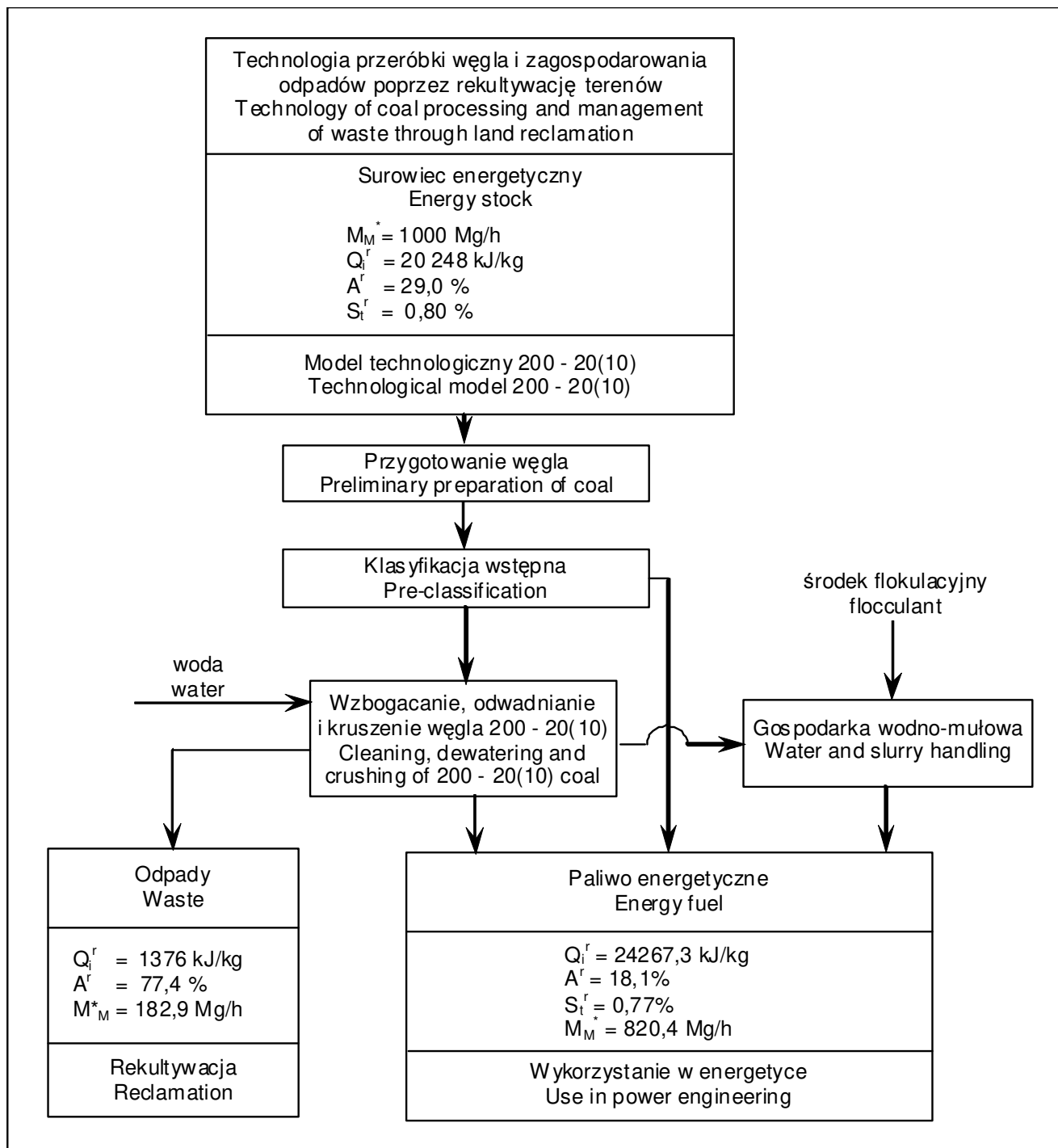
2. Characteristics of coal preparation technologies analysed with the use of the LCA technique

Four models of coal upgrading technologies, relatively often used in practice, have been characterised. They have been marked with symbols M1, M2/50, M2/G, and M3.

Figure 1 presents the block diagram of the M1 technology, which includes cleaning of coal in the size range 200–20(10) mm, and crushing of the whole concentrate of 200–20 (10) mm. The principal technological operations include preliminary preparation of coal and separation of impurities from the run-of- mine, two- point cleaning of coarse coal in DISA separators or jigs, mechanical dewatering of the upgraded products, crushing of the whole concentrate up to the 20(10) mm class, and mixing with raw coal fines and mud. The product obtained this way is a commercial size grade, and its technological characteristics is presented in Fig.1. Attention should be paid to the fact that, in the case of using the M1 model in defined conditions, the ash content in the concentrate will be 18.1%, and

a wartość opałowa około 24 200 kJ/kg. Elementem technologii jest gospodarka wodno-mułowa. Model technologiczny M1 przewiduje zagospodarowanie odpadów powstających w procesie wzbogacania i obejmuje ich transport do miejsca rekultywacji terenu oraz czynności związane z utworzeniem złoża.

calorific value will be about 24 200 kJ/kg. One of the element of the technology is water-and-slurry handling. The M1 technological model takes into account the management of waste produced in the process of cleaning, and includes its transport to the land reclamation location, and the actions connected with preparation of the deposit.



Rys. 1
Schemat blokowy technologii M1

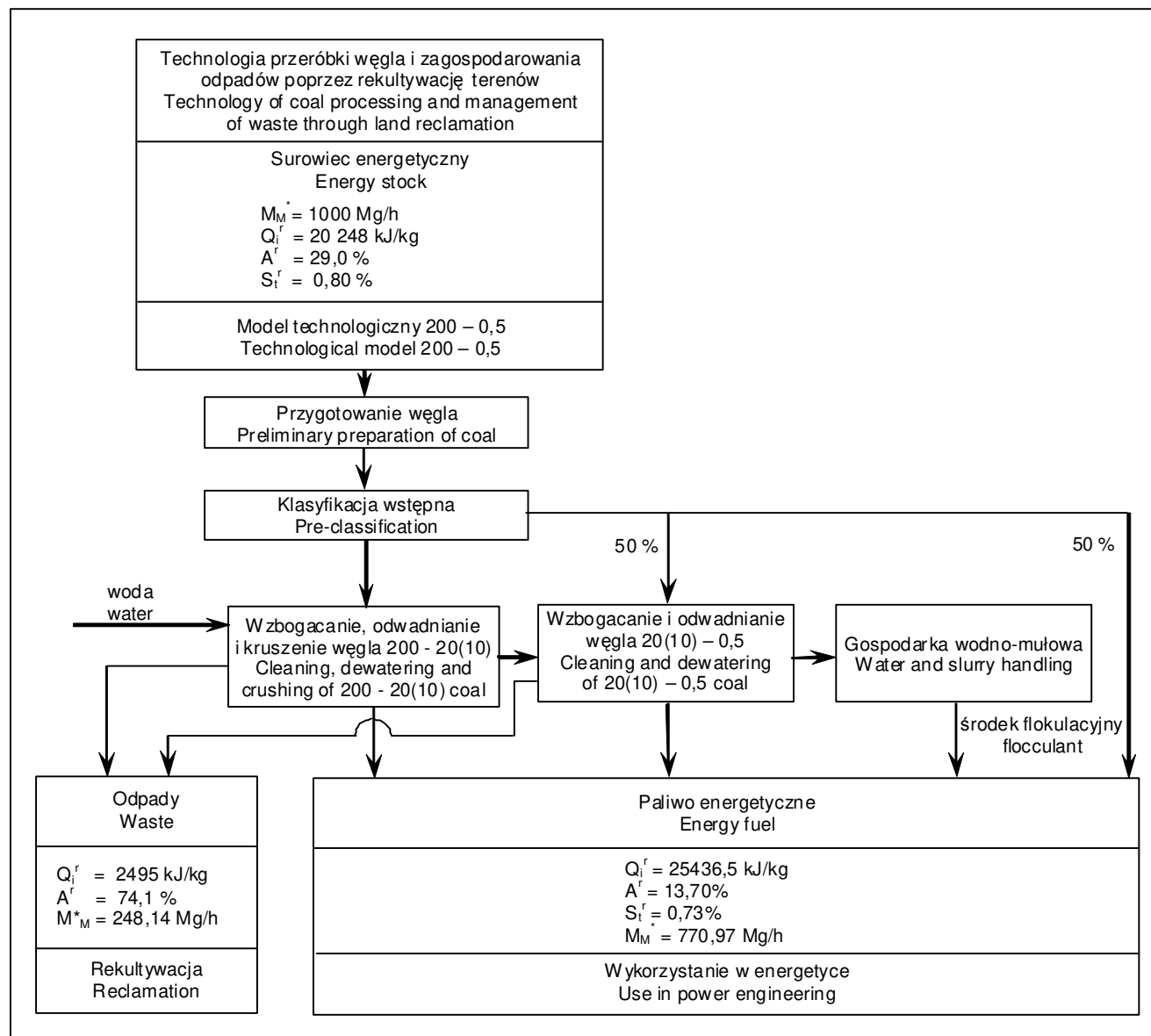
Fig. 1
Block diagram of the M1 technology

Schemat blokowy modelu technologii oznaczonej symbolem M2/50 przedstawiono na rys. 2. Model ten różni się od modelu M1 tym, że dodatkowo

The block diagram of the technology marked M2/50 is presented in Fig. 2. This model differs from the model M1 that, additionally, 50% of coal

50% mialu zawartego w surowcu energetycznym poddaje się wzbogaceniu w osadzarkach. W założonych warunkach uzyskuje się koncentrat o zawartości popiołu 13,7 %, a wartość opałowa koncentratu wynosi około 25 400 kJ/kg.

finer are subject to cleaning in the jigs. In the assumed conditions, a concentrate is obtained with the 13.7% ash content, and its calorific value is ca. 25 400 kJ/kg.



Rys. 2
Schemat blokowy technologii M2/50

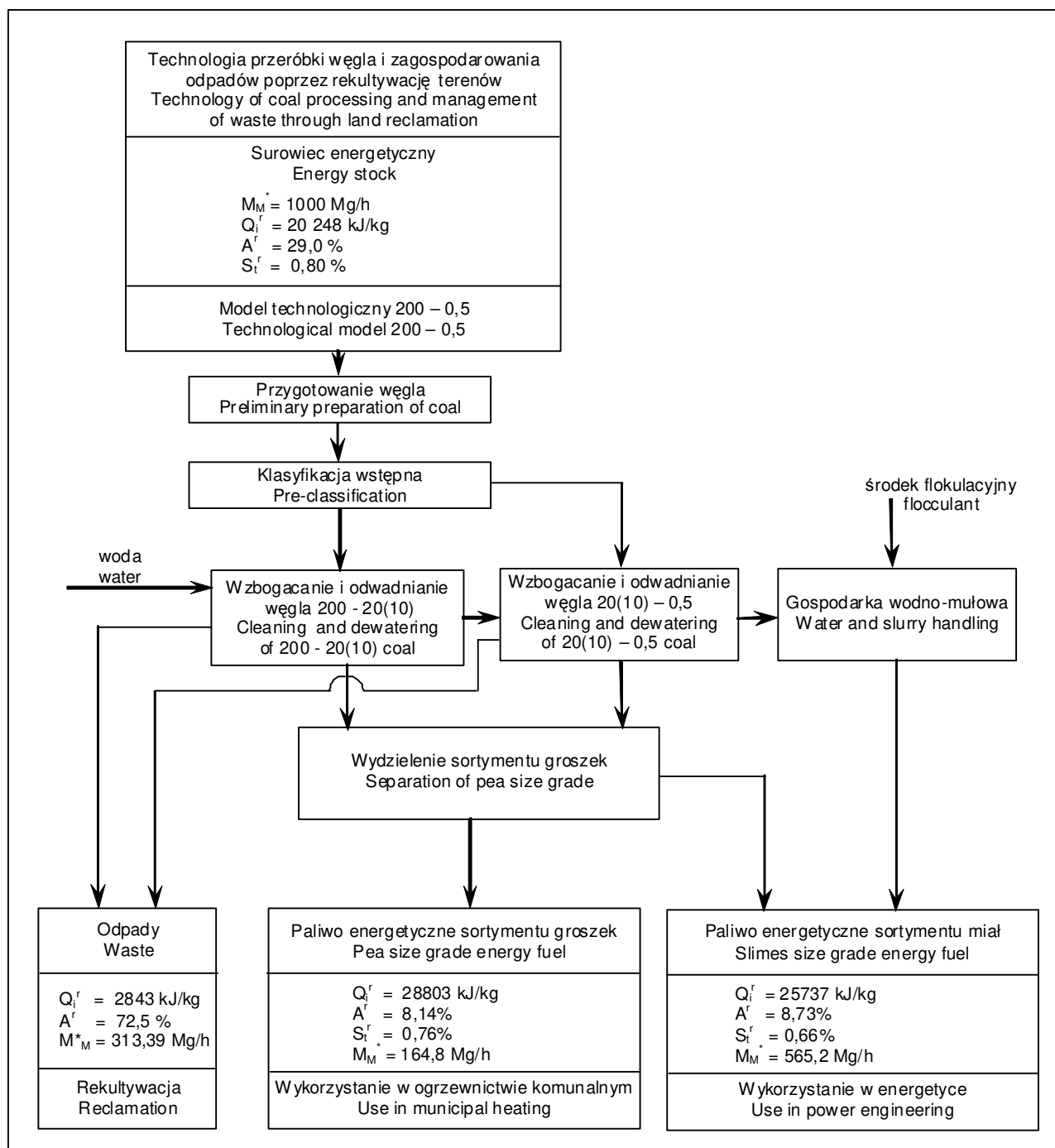
Fig. 2
Block diagram of M2/50 technology

Oznaczony symbolem M2/G schemat blokowy modelu technologii wzbogacania węgla przedstawiono na rys. 3. Podstawowe operacje technologiczne obejmują w tym przypadku rutynowe przygotowanie węgla i wydzielenie z urobku zanieczyszczeń, klasyfikację wstępną na węgiel 200–20(10) mm i 20(10)–0 mm, dwuproduktowe wzbogacanie węgla grubego w separatorach DISA lub osadzarkach oraz dwuproduktowe wzbogacanie węgla 20(10)–0,5 mm w osadzarkach, odwodnienie produktów wzbogacania, wydzielenie groszków 30–20 mm i 20–10 mm odpowiednio z koncentratu grubo ziarnistego i mia-

The block diagram of the coal upgrading technology model marked M2/G is presented in Fig. 3. The principal technological operations include, in this case, routine preliminary preparation of coal and separation of impurities from coal, pre-classification into 200–20(10) mm and 20 (10)–0 mm coal, two-product cleaning of coarse coal in DISA separators or jigs, and two-product cleaning of 20(10)–0.5 coal in jigs, dewatering of products, separation of 30–20 mm and 20–10 mm pea size coal from coarse-particle concentrate and fines respectively,

łu, kruszenie koncentratu 200–30 mm do klasy mniejszej od 10 mm i dla uzyskania paliwa energetycznego (produktu handlowego) mieszanie z koncentratem miałowym 10–0,5 mm i odwodnionym mułem surowym 0,5–0 mm. Uzyskuje się dwa produkty, to jest paliwo energetyczne sortymentu groszek o zawartości popiołu 8,14% i wartości opałowej około 28800 kJ/kg oraz miał o zawartości popiołu 8,73% i wartości opałowej około 25700 kJ/kg. Podobnie jak w omówionych wyżej modelach technologicznych przewiduje się zagospodarowanie odpadów do rekultywacji terenów.

crushing of 200–30 mm concentrate to the class smaller than 10 mm, and then, mixing with coal-fines concentrate of 10–0.5 mm and dewatered raw slurry of 0.5–0 mm, to obtain an steam fuel of the pea particle — size with the ash content of 8.14% and calorific value of ca. 28 800 kJ/kg, and fines with 8.73 ash content, and calorific value of ca. 25 700 kJ/kg. Similarly as in the discussed above technological models, it is planned to use the waste in land reclamation.

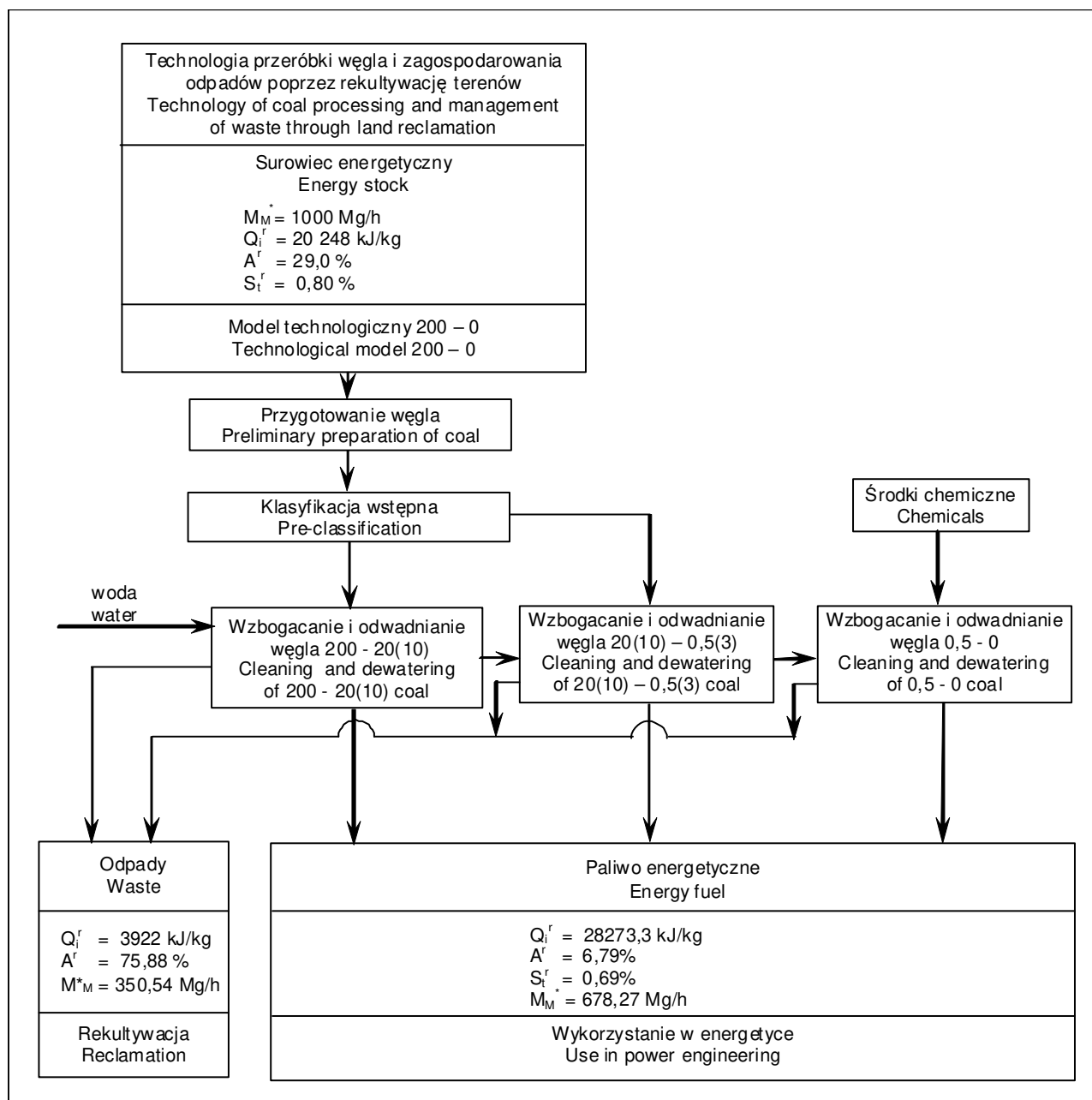


Rys. 3
Schemat blokowy technologii M2/G

Fig. 3
Block diagram of M2/G technology

Na rys. 4 przedstawiono schemat blokowy czwartego z charakteryzowanych modeli technologii wzbogacania węgla, oznaczonego symbolem M3. W tym przypadku obok podstawowych operacji technologicznych dotyczących węgla 200–20(10) mm przedstawionych w omówionych wyżej modelach wzbogaca się miał węglowy 20(10)–3 mm w osadzarkach, klasę ziarnową 3–0,5 mm we wzbogacalnikach zwojowych oraz muł węglowy 0,5–0 mm metodą flotacji lub klasyfikacji odśrodkowej. Po odwodnieniu koncentratów uzyskuje się paliwo energetyczne z pokruszonego węgla gruboziarnistego (200–30 mm), mialu i flotokoncentratu. W wyniku stosowania modelu technologii M3 otrzymuje się produkt o zawartości popiołu 6,79% i wartości opałowej około 28 300 kJ/kg.

Figure 4 shows the block diagram of the fourth discussed model of coal upgrading technology, marked M3. In this case, apart from the main technological operations relating to 200–20 (10) coal, as presented in the above discussed models, the fines of coal of 20(10)–3 mm is cleaned in the jigs, class 3–0.5 mm in the spiral concentrators, and 0.5–0 mm coal slurries with the use of flotation or centrifugal classification methods. After dewatering of the concentrates, the steam fuel is obtained from the crushed coarse-size coal (200–30 mm), fines and flotation concentrate. As a result of using the M3 technology model, one obtains a product with the 6.79% ash content and calorific value of ca. 28 300 kJ/kg.



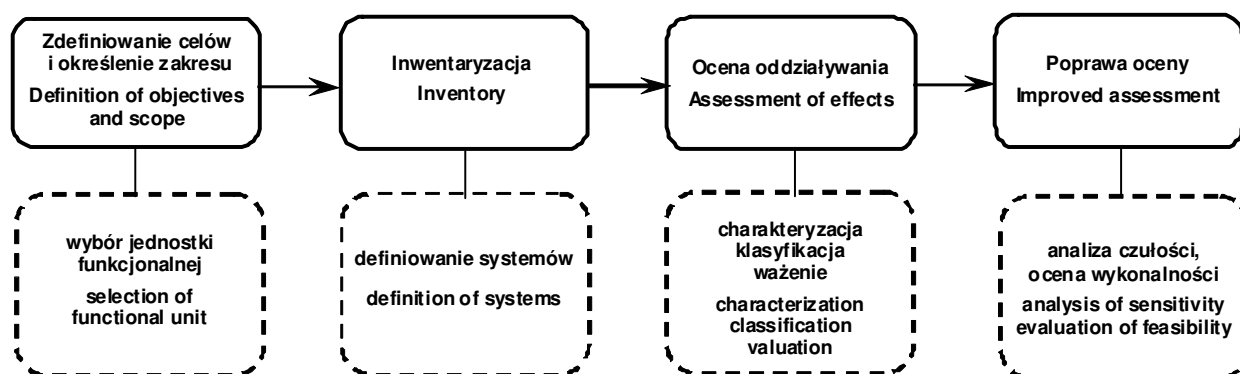
Rys. 4
Schemat blokowy technologii M3

Fig. 4
Block diagram of M3 technology

Analiza wyników wzbogacania, które można uzyskać stosując omówione wyżej modele technologii wykazuje, że w przypadku każdego kolejnego modelu otrzymuje się produkt o lepszej jakości. Stosując model M1 można uzyskać paliwo węglowe o zawartości popiołu 18,1%, stosując modele M2/50 i M2/G odpowiednio 13,7% i około 8,5%, a stosując najbardziej złożony model technologii M3 koncentrat o zawartości popiołu 6,79%.

3. Metodyka oceny technologii czystego węgla z zastosowaniem oceny cyklu życia

Technika oceny cyklu życia zwana od pierwszych liter angielskiej nazwy (Life Cycle Assessment) metodą LCA [PN-EN ISO 14 04(0-3)] jest procesem służącym do oceny obciążeń środowiska towarzyszących produktowi, procesowi lub innego rodzaju działalności w ciągu całego cyklu życia; obejmuje ona wydobywanie i przerob surowców, przetwórstwo, transport i dystrybucję, użytkowanie, powtórne użytkowanie, konserwację, recykling oraz ostateczne pozbycie się zużytego produktu. LCA jest techniką służącą do szacowania aspektów środowiskowych i potencjalnych wpływów towarzyszących produktowi lub procesowi przez: kompilację wszystkich istotnych elementów wejściowych i wyjściowych w system, ocenę potencjalnego wpływu na środowisko czynników wynikających z elementów wejściowych i wyjściowych, interpretację rezultatów analizy inwentarzowej i szacowania wpływów w odniesieniu do obiektu badań. Kategorie, w których rozpatrywane są wpływy obejmują: zużycie surowców, zdrowie człowieka i konsekwencje ekologiczne. Schemat przeprowadzania LCA przedstawia rysunek 5.



Rys. 5
Fazy LCA [Czaplicka 2002]

Technikę oceny cyklu życia technologii wzbogacania węgla zastosowano jako podstawowe narzędzie do oceny efektywności ekologicznej technologii czystego węgla, ponieważ umożliwia:

An analysis of the results of cleaning, which can be obtained using the technology models discussed above, points out that, in the case of each succeeding, one obtains a better quality product. By using the M1 model, it is possible to obtain coal-based fuel with the ash content of 18.1%, while using the M2/50 and M2/G models with 13.7% and ca. 8.5%, respectively, and by using the most complex technology model M3, the concentrate with the 6.79% ash content.

3. Methodology of evaluation of the clean coal technologies using the Life Cycle Assessment technique

The Life Cycle Assessment technique, LCA [EN ISO 1404 (1-4)] is a process which serves to evaluate the charge on the environment relating to a product, process or other type of activity in its whole life cycle, and includes winning and preparation of raw materials, processing, transport and distribution, use, reuse, maintenance, recycling, and final disposal of the used product. The LCA is a technique that serves to evaluate environmental aspects and potential effects which accompany the product or process through: compilation of all important input and output elements in the system, evaluation of potential effects resulting from input and output elements on the environment, interpretation of the results of inventory analyses and assessment of the effects in relation to the investigated object. The categories, in which these effects should be considered include: use of raw materials, human health and ecological consequences. A schematic diagram of performing the LCA analysis is shown in Fig.5.

Fig. 5
Phases of the LCA [Czaplicka 2002]

The technique for evaluation of the life cycle of coal upgrading technologies has been applied as a basic tool in evaluating the ecological effectiveness of clean coal technologies, as it makes possible to:

- tworzenie i rozwój polityki prośrodowiskowej poprzez dostarczanie politykom i agendum rządowym, na różnych poziomach zarządzania, informacji pozwalających na odpowiednią gospodarkę zasobami oraz ustalenie kierunków rozwoju prac naukowo-badawczych i preferowanie w decyzjach politycznych technologii o małym ujemnym oddziaływaniu na środowisko,
- edukację proekologiczną przez dostarczanie informacji pozwalających lepiej zrozumieć zagadnienia zużycia surowców i rodzajów emisji towarzyszących produktowi, procesowi i innego rodzaju aktywności człowieka oraz tworzenie programów szkoleniowych wpływających na projektowanie i stosowanie wyrobów i procesów o mniejszym oddziaływaniu na środowisko,
- rozwój produktu/procesu i jego doskonalenie przy wyborze alternatywnych materiałów, produktów, procesów, porównywanie zużycia surowców i emisji towarzyszących podobnym procesom/technologiom.

Sposób przeprowadzania oceny został określony w normach serii PN-EN ISO 14040[1-3], które opisują cztery podstawowe składniki LCA:

- definicję celu i zakresu badań oraz identyfikację przyczyn określających potrzebę przeprowadzenia badań, zamierzeń dotyczących wdrożeń, odbiorców badań, określenie systemu ograniczeń w badaniach,
- analizę inwentarzową — identyfikację i ilościowe określenie elementów wejściowych i wyjściowych, jakie daje produkt lub jego obsługa,
- analizę wpływów — ocenę i zrozumienie największych i najważniejszych wpływów środowiskowych, jakie daje produkt lub jego obsługa,
- interpretację — ocenę i wdrożenie działań umożliwiających poprawę środowiska.

Pierwsza faza oceny, czyli określenie celu i zakresu badań polega na jednoznacznym ustaleniu powodów przeprowadzenia badań oraz ich zamierzonego zastosowania i odbiorcy. Podstawą oceny LCA jest inwentaryzacja LCI [PN-EN ISO 14041] (life cycle inventory analysis) obejmująca gromadzenie danych dla przeprowadzenia ilościowej oceny istotnych elementów wejściowych i wyjściowych analizowanego systemu. Elementy wejściowe do procesu to:

- surowce i energia (wkład środowiskowy),
- produkty, półprodukty i energia, która jest efektem innego procesu (wkład ekonomiczny).

- create and develop of pro- ecological policy through providing the politicians and governmental organs, at various management levels, with the information which enables to conduct proper management of resources, and to set the directions of R&D work and preferences, in political decisions, for technologies with low effects on the environment,
- conduct pro-ecological education through delivering information which makes possible to understand better the questions of use of raw materials and types of emissions that accompany the product, process, and other types of human activities, as well as creating training programs influencing designing and use of products and processes with the lowest impact on the environment,
- develop and improve the product/process by selecting alternative materials, products and processes through comparing the use of raw materials and emissions that accompany the similar processes/technologies.

The method for conducting the analysis has been specified in the series of EN ISO 14040 [1-4] standards, which describe the four basic components of the LCA:

- definition of the objective and scope of investigation, and identification of causes that define the need to carry out the research, implementation- related intentions, users of the research results, definition of the system of limitations in the research,
- inventory analysis — identification, compilation and quantitative evaluation of input and output effects, which are provided by the product or servicing it,
- analysis of the effects — assessment and understanding of most important environmental effects given by a product or service.
- interpretation- evaluation and implementation of actions that make possible to improve the environment.

The first phase of the evaluation process, that is defining the objective and scope of investigation relies on unambiguous identification of the reasons determining the need to conduct the investigation, and its intended use and recipient. The basis for performing an LCA analysis is the LCI (Life Cycle Inventory) analysis [EN ISO 14042], which includes the collection of data with the aim to perform quantitative evaluation of important input and output elements of the analysed system. The process input elements are:

- raw materials and energy (environmental input),
- products, intermediate products and energy being an effect of another process (economic input).

Podobnie można podzielić elementy wyjściowe jako:

- bezpośrednią emisję do środowiska,
- efekt w postaci produktu, półproduktu lub energii.

Na podstawie informacji o elementach wejściowych i wyjściowych każdego procesu oraz procesowego drzewa cyklu życia można przeprowadzić inwentaryzację wszystkich oddziaływań środowiskowych związanych z produktem. Wynikiem inwentaryzacji są tzw. tablice oddziaływań.

Celem trzeciej fazy, czyli oceny wpływu cyklu życia LCIA (life cycle impact assessment) [PN-EN ISO 14042] jest określenie znaczenia potencjalnych wpływów środowiskowych wynikających ze zinventaryzowanych oddziaływań.

W omawianej pracy do oceny wpływów (LCIA) technologii wzbogacania węgla wykorzystano metodykę ekowskaźnika 99 [Goedkoop M. et al. 2000, Goedkoop M., Spriensma R. 2000] zwanego dalej ekowskaźnikiem Ew. Metoda ekowskaźnika jest podejściem do problemu szacowania typu „góra-dół” polegającym na określeniu na wstępie kategorii, w których oceniane są wpływy środowiskowe, tj. zdrowie człowieka, jakość ekosystemu i zasoby naturalne, a następnie przyporządkowaniu wyników analizy inwentarzowej do tych kategorii.

W kategorii „zdrowie człowieka” zawarta jest idea mówiąca, że życie człowieka teraz i w przyszłości powinno być pozbawione zagrożeń związanych z przenoszonymi przez środowisko chorobami, kalectwem i nienaturalną śmiercią.

W kategorii „jakość ekosystemu” zawarte jest przesłanie ochrony żywych elementów środowiska, poza człowiekiem, które nie powinny ulegać degradacji z powodu destrukcyjnych zmian w ich populacji i rozmieszczeniu geograficznym.

W kategorii „surowce” znajduje się stwierdzenie dotyczące oszczędzania zasobów naturalnych, ważne dla przyszłych pokoleń.

W cyklu życia produktu mamy do czynienia z trzema sferami:

- technosfera — sfera techniczna — zawiera opis cyklu życia, identyfikację emisji z procesów, określenie procedur alokacji na podstawie związków przyczynowych,
- ekosfera — sfera ekologiczna — dotyczy modelowania zmian nakładanych na „środowisko”,
- sfera wartościowania — związana jest z modelowaniem postrzegania ważności tych zmian (szkód), jak również zarządzanie wyborem modeli utworzonych w ramach techno- i ekosfery.

Jakkolwiek sfery te częściowo zachodzą na siebie, to mają one odmienny charakter. Przy opraco-

In a similar way, one can divide the output elements as:

- direct emissions to the environment,
- effect in the form of product, intermediate product or energy.

On the basis of information on the input and output elements of each process and process life cycle tree, one can perform an inventory analysis of all product-related environmental effects. A result of the inventory are the so-called tables of effects.

The third phase, that is life cycle impact assessment (LCIA) [EN ISO 14042] is the determination of importance of potential environmental effects resulting the effects from the inventory analysis.

In the work discussed, to evaluate the effects (LCIA) of coal cleaning technologies, the method of the eco-index 99 [Goedkoop et al. 2000; Goedkoop, Spriensma 2000], further on called eco-indicator Ew, have been used. The eco-index method is an approach to the problem of assessment of the “up-down” type, which relies on determining, in the beginning, of the category in which the environmental effects, that is human health, quality of ecosystem and natural resources, are evaluated, then assigning the results of the inventory analysis to these categories.

In the “human health” category, the idea is included saying that human life, now and in the future, should be free of hazards connected with the diseases, lameness, unnatural death conveyed by the environment.

In the category “ecosystem quality”, there is an idea of protection of living environmental elements, apart from humans, which should not be subject to degradation in consequence of destructive changes in their population and geographic distribution.

In the category “raw materials”, there is a statement relating to saving natural resources being of value for future generations.

In the product life cycle, one has to do with three spheres:

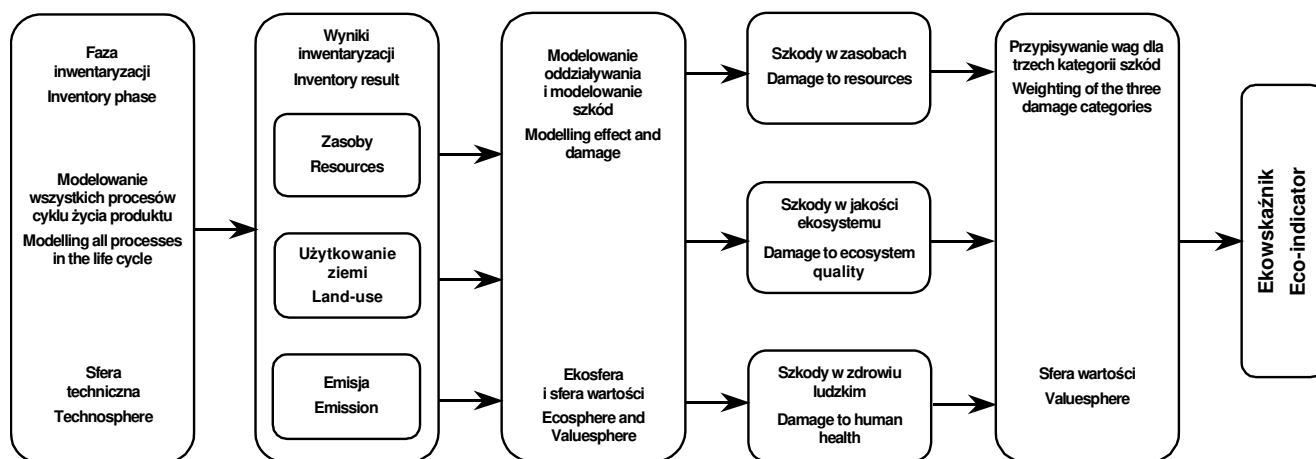
- technosphere — technical sphere — which contains the description of the life cycle, identification of emissions from the processes, specification of allocation procedures on the basis of causalities,
- ecosphere — ecological sphere — relates to modelling the changes “imposed on the environment”,
- valuation sphere — is connected with modelling of perception of importance of these changes (damages), and with management of selection of the models created within the framework of the techno- and eco-spheres.

Although these spheres overlap, they still differ in character. On elaboration of the eco-indicators

wywaniu ekowskażników 99 zastosowano podejście trójstopniowe, a mianowicie:

- model cyklu życia sporządzany jest w technosferze, a wyniki przedstawia się w tablicy inwentaryzacyjnej,
- modelowanie ekosfery wykorzystywane jest do połączenia tablicy inwentaryzacyjnej z trzema kategoriami szkód,
- modelowanie sfery wartościowania jest stosowane do przypisywania odpowiednich wag wartościom odzwierciedlającym kategorie szkód, tak aby uzyskać jeden wskaźnik. Na tym etapie następuje modelowanie wartości wyboru w ekosferze.

Całość metody obrazuje rysunek 6.



Rys. 6

Koncepcja opracowywania ekowskażników 99
[Goedkoop M. et al. 2000]

Fig. 6

The idea of elaboration of eco-indexes 99
[Goedkoop M. et al. 2000]

W procesie badania technologii czystego węgla techniką LCA wyróżniono trzy główne etapy:

- identyfikację modeli technologii,
- identyfikację i inwentaryzację elementów wejściowych i wyjściowych charakteryzujących każdy model technologii wzbogacania,
- ocenę wpływu na środowisko wynikającą ze zużycia surowców i różnego rodzaju emisji dla każdego analizowanego modelu technologii wzbogacania.

W celu obliczenia wartości ekowskażnika wyrażającego wpływ środowiskowy analizowanej technologii:

- opracowano drzewo życia dla omawianych modeli technologii,
- wybrano odpowiednie dla danej technologii jednostki funkcjonalne,
- opracowano tablice inwentaryzacyjne,
- obliczono wartość ekowskażnika odpowiadającą jednostce funkcjonalnej każdej technologii,

99, the three-step approach has been applied, namely:

- life cycle model is prepared in the technosphere, and the results are presented in the inventory table,
- modelling of the ecosphere is utilised to link the inventory table to three categories of damages,
- modelling of the valuation sphere is used to assign suitable weight factors to the values which reflect the categories of damages, in order to obtain one index. At this stage, modelling of the value of choice in the ecosphere takes place.

The method as a whole is depicted in Fig. 6.

In the process of investigation of clean coal technologies using the LCA technique, three main stages have been specified:

- identification of technology models,
- identification and making inventory of input and output elements which characterise each of cleaning technology models,
- evaluation of the effects on the environment resulting from the use of raw materials and various types of emission for each of the analysed models of cleaning technology.

With the aim to calculate the values of an eco-index showing the environmental effects of the analysed technology:

- life tree have been developed for the discussed technology models,
- functional units adequate for a given technology have been selected,
- inventory tables have been elaborated,
- value of the eco- index corresponding with the functional unit of each technology have been calculated,

- przeprowadzono analizę obciążenia środowiska w poszczególnych kategoriach strat (zdrowie człowieka, jakość ekosystemu i zasoby).

Obliczone wartości ekowskaźników dla modelowych procesów wzbogacania stanowiły kryterium ekologicznej oceny tych technologii.

Obciążenie środowiskowe jako wynik wzbogacania węgla

Celem analizy była ocena i porównanie wpływów środowiskowych wynikających ze wzbogacania węgla przy wykorzystaniu scharakteryzowanych wyżej modeli technologii wzbogacania. Jako jednostkę funkcjonalną w badaniach przyjęto 1000Mg wzbogaconego węgla, tzn. wszystkie obliczone wartości obciążenia środowiska związane są z otrzymaniem 1000Mg wzbogaconego węgla.

Na rys. 7 przedstawiono procesowe drzewo życia zawierające istotne elementy wejściowe i wyjściowe dla technologii wzbogacania węgla, a w tablicy 1 wyniki analizy inwentarzowej przeprowadzonej dla rozpatrywanych czterech modeli wzbogacania węgla.

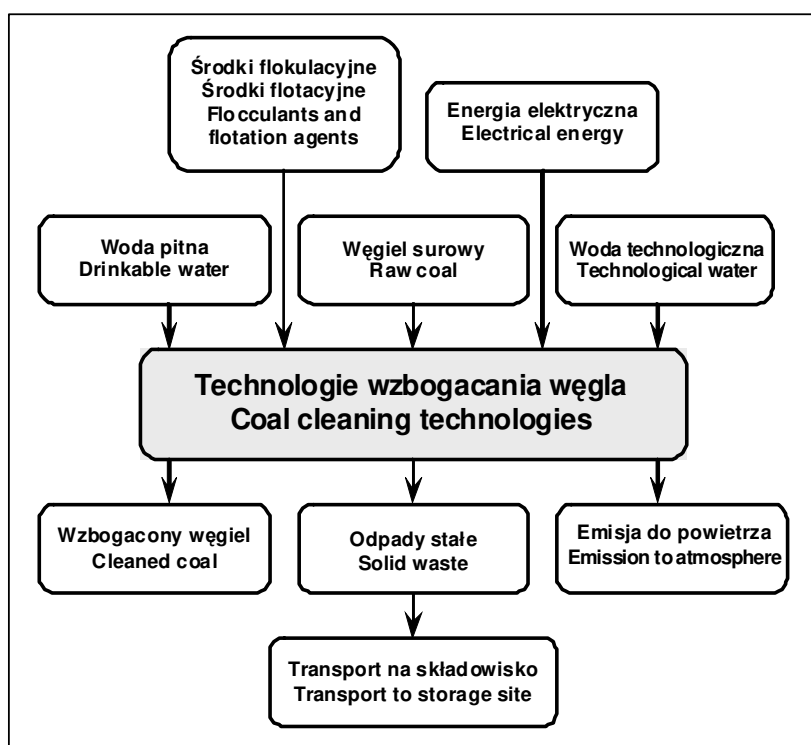
- an analysis has been performed of the charge on the environment in specified damage categories (human health, quality of ecosystem and resources).

The calculated eco-indicator values for model cleaning processes were the criteria for ecological assessment of these technologies.

Charge on the environment as a result of coal upgrading

The aim of an analysis was the assessment and comparison of the environmental effects resulting from cleaning of coal, with the use of upgrading technology models characterised above. In the study, 1000 Mg of cleaned coal was assumed to be a functional unit. This means that all calculated values of the charge on the environment are connected with obtaining of 1000 Mg of cleaned coal.

Fig. 7 presents a process tree that includes input and output elements important for coal cleaning technologies, while Table 1 shows the results of the inventory analysis carried out for the four cleaning models considered.



Rys. 7
Drzewo procesowe dla technologii wzbogacania węgla

Fig. 7
Process tree for coal cleaning technologies

Do obliczeń wartości ekowskaźnika opowiadającej zinventaryzowanym elementom wejściowym i wyjściowym wykorzystano program komputerowy SimaPro 5.1 oraz bazy danych zawarte w wyposażeniu tego programu (Standard, Franklin, Idemat). [www.pre.nl]. W tablicy 2 zamieszczono szczegó-

To calculate the eco-index values corresponding with the input and output elements from the inventory, the SimaPro 5.1 [www.pre.nl] computer program was used together with the databases included in this program (Standard, Franklin, Idemat). Collected in Table 2 are the detailed results of the

łowe wyniki obciążenia środowiska w poszczególnych kategoriach oddziaływań.

Na rysunku 8 przedstawiono porównanie obciążenia środowiska wywołanego przez rozpatrywane technologie wzbogacania węgla w trzech kategoriach strat.

Wszystkie rozpatrywane technologie największe obciążenie środowiska wywołują w kategorii „zasoby”, co jest związane z wydobywaniem paliw kopalnych. Są one źródłem energii zużywanych przez analizowane technologie. Obciążenie w tej kategorii stanowi 98,6% całego obciążenia związanego z technologią M1, a w przypadku technologii M3 stanowi 96,5%. W kategorii „zdrowie człowieka” obciążenie środowiska największe jest dla technologii M3 i wynosi 262,39 Ew, co stanowi 2,8% całkowitego wpływu środowiskowego związanego z tą technologią. W tej kategorii największe straty środowiskowe dla wszystkich analizowanych przypadków związane są z występowaniem problemów oddechowych wywoływanych przez zanieczyszczenia nieorganiczne, w następnej kolejności ze zmianami klimatycznymi i wzrostem rakotwórczości. W kategorii „jakość ekosystemu” najmniejszy wpływ środowiskowy związany jest z wykorzystaniem technologii M1 i wynosi 22,26 Ew (około 0,3% całego obciążenia).

charge on the environment in the individual categories of the effects.

Fig. 8 presents the comparison of the charge on the environment produced by the considered coal cleaning technologies in three categories of losses.

All the technologies considered produce the highest charge on the environment in the “resources” category, which is connected with extraction of mineable fuels. They are the source of energy consumed by the analysed technologies. The charge in this category is 98.6% of the total charge related to the technology M1, and in the case of the technology M3 it is 96.5%. In the “human health” category, the highest charge on the environment is for the technology M3, and is equal to 262.39 eco-index values, which is 2.8% of a total environmental effects connected with this technology. In this category, the highest environmental losses for all the analysed cases is connected with the occurrence of breathing problems resulting from inorganic pollutants, and then with climatic changes and increasing carcinogenic effect. In the “ecosystem quality”, the lowest environmental effect is connected with the use of the technology M1, and equals 22.26 eco-index values (being 0.3% of a total charge).

Tablica 1
Wyniki analizy inwentarzowej
dla technologii wzbogacania węgla

Table 1
Results of an inventory analysis
for coal cleaning technologies

Element wejściowy/wyjściowy Input/output element		Jednostka Unit	Technologie wzbogacania węgla Coal cleaning technologies			
			M1	M2/G	M2/50	M3
Elementy wejściowe Input elements	Węgiel surowy Raw coal	Mg	1 218,92	1 297,07	1 369,86	1 474,34
	Energia Energy	MWh	3,31	7,49	7,91	12,04
	Woda technologiczna Technological water	Mg	4,02	24,79	59,4	4,25
	Woda pitna Drinkable water	Mg	0,92	1,34	1,42	2,29
	Flokulant Flocculant	kg	0,24	0,3	14,39	6,64
	Środek flotacyjny Flotation agent	Mg	—	—	—	0,13
Elementy wyjściowe Output elements	Wzbogacony węgiel Cleaned coal	Mg	1 000	1 000	1 000	1 000
	Emisja do powietrza – pyły Emission to atmosphere – dust	g	3,04	4,52	4,78	6,98
	Odpady Waste	Mg	222,94	321,85	429,3	516,81
	Transport odpadów Transport of waste	km	21	21	21	21

Tablica 2

Wielkości oddziaływań w poszczególnych kategoriach
wpływów środowiskowych dla rozpatrywanych
technologii wzbogacania węgla

Table 2

Values of effects in individual categories
of environmental effects for coal cleaning
technologies under consideration

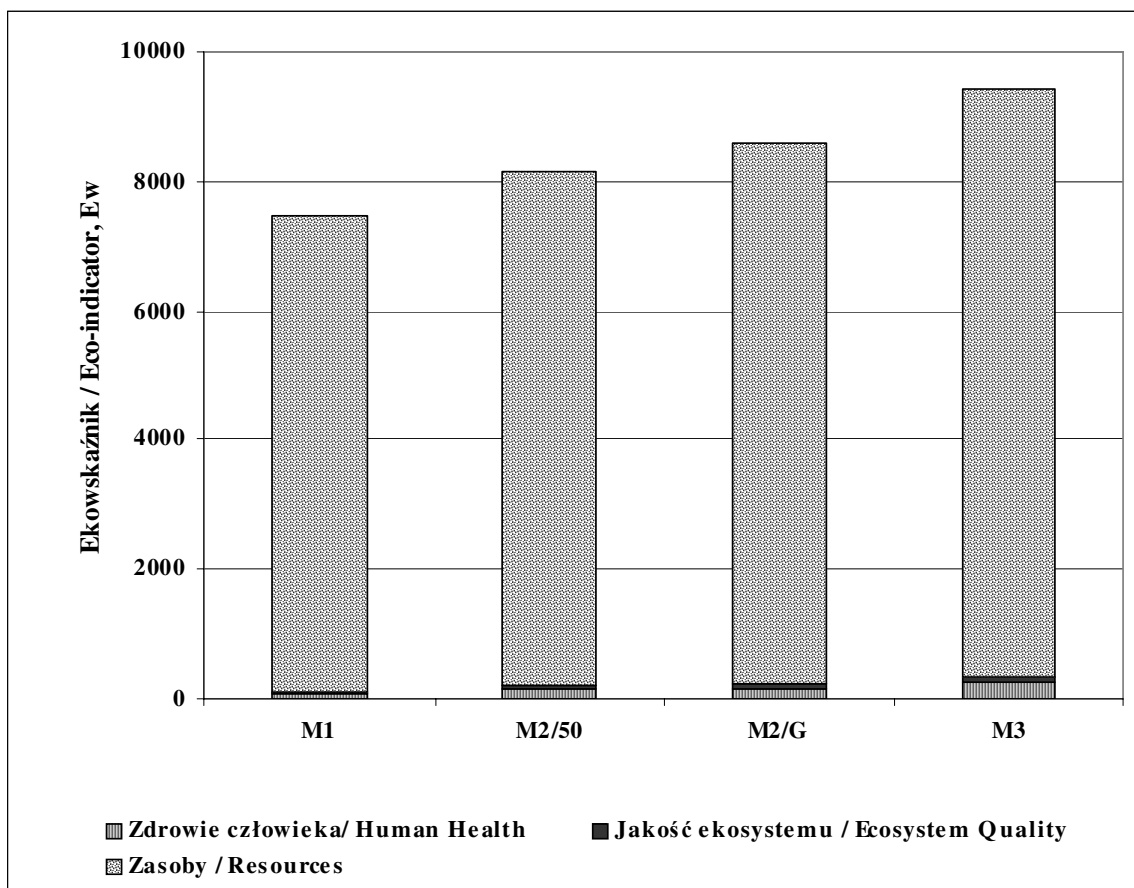
Kategoria obciążenia środowiska Impact category		Technologie wzbogacania węgla wartości ekowskaźnika, Ew Coal cleaning technologies, Eco-indicator, Ew			
		M1	M2/50	M2/G	M3
Zdrowie człowieka Human Health	Rakotwórczość Carcinogens	14	31,8	32,5	48,1
	Problemy oddechowe-org. Resp. organics	0,188	0,362	0,403	0,586
	Problemy oddechowe-nieorg. Resp. inorganics	51,3	109	114	162
	Zmiany klimatyczne Climate change	15,4	34,8	35,2	51,5
	Radioaktywność Radiation	0,0134	0,0722	0,0283	0,0333
	Warstwa ozonowa Ozone layer	0,0511	0,105	0,11	0,169
Zdrowie człowieka Human Health		80,953	176,14	182,24	262,39
Jakość ekosystemu Ekosystem Quality	Ekotoksyczność Ecotoxicity	8,87	16,8	18,9	25,9
	Zakwaszenie Acidification/ Eutrophication	6,05	12,2	13,2	18,6
	Wykorzystanie gruntu Land use	7,34	13,4	15	19,6
Jakość ekosystemu Ekosystem Quality		22,26	42,4	47,1	64,1
Zasoby Resources	Minerały Minerals	0,399	0,713	0,802	1,02
	Paliwa kopalne Fossil fuels	7 390	7 950	8 390	9 110
Zasoby Resources		7 390,4	7 950,71	8 390,8	9 111,02
Razem Total		7 493,61	8 169,25	8 620,14	9 437,51

Wykorzystując LCA do oceny wpływów na środowisko wybranych technologii wzbogacania węgla stwierdzono, że największy niekorzystny efekt związany jest ze wzbogaceniem za pomocą technologii M3 i wynosi on 9437,51 Ew.

Średnie obciążenie środowiska związane z otrzymaniem 1000 Mg wzbogaconego węgla przy wykorzystaniu analizowanych technologii wynosi 8430,13Ew i w 97% występuje w kategorii „zasoby”.

By using the LCA to evaluate the effects of selected coal cleaning technologies on the environment, it was found that the highest negative effect is produced by the cleaning technology M3, and equals 9437 eco- index values.

The average charge on the environment is connected with obtaining of 1000Mg of clean coal using the technologies under consideration and is 8430.13 eco- index values, and is present in 97% in the category “resources”.



Rys. 8
Obciążenie środowiska związane z procesami przeróbki
węgla i zagospodarowania odpadów

Fig. 8
Environmental charge related to coal cleaning
and waste management processes

5. Uwagi końcowe

Zastosowanie do wzbogacania węgla modeli technologicznych przedstawionych na rys. 1 ÷ 4 umożliwia produkcję paliw o coraz lepszej jakości. Różnica zawartości popiołu w produktach uzyskanych po zastosowaniu modeli M1 i M3 wynosi ponad 11%. Obliczenia oceniające te modele, wykonane metodą ekowskaźnika wykazały, że kiedy uzyskuje się paliwo lepszej jakości, a więc stosuje model technologii M3, oddziaływanie na środowisko jest mniej korzystne w porównaniu z oddziaływaniem mającym miejsce w przypadku wzbogacania z zastosowaniem modelu M1, mimo że uzyskiwane paliwo ma znacznie gorszą jakość. Jest to wynikiem przede wszystkim zwiększonym zużyciem energii przez technologie pozwalające uzyskiwać lepsze gatunki węgla. O wyborze modelu technologii wzbogacania węgla decydować powinny obok ekologicznych także kryteria o charakterze ekonomicznym i społecznym. Analiza wyników obliczeń dowodzi, że spośród trzech analizowanych kategorii strat, to jest „zdrowia człowieka”, „jakość ekosystemu” i „zasoby naturalne”, aż 98,6% w przypadku modelu technologii M1 oraz 96,5% w przypadku technologii M3 przypada na straty w kategorii „zasoby”. Tak dużym

5. Concluding remarks

The use of four model coal upgrading technologies, as presented in Figs. 1-4, makes possible to produce fuels with highest and highest quality. The difference in the ash content in the products obtained in consequence of using the models M1 and M3 is above 11%. The computations to evaluate these models, performed with the use of the eco-index method have shown that in the case of using a higher quality fuel, that is the M3 technology model is used, the effects on the environment are less advantageous as compared to the effects produced when using the M1 model, in spite of the fact that the fuel thereby obtained is of a lower quality. This is, first of all, a result of increased energy consumption by the technologies which make possible to obtain better coal grades. The selection of a model coal cleaning technology should be conditioned by criteria of economic and social character, in parallel with the ecological ones. An analysis of computational results proves that from among three analysed categories of losses, that is “human health”, “ecosystem quality” and “natural resources, as far as 98.6%, in the case of the M1 technology model, and 96.5%, in the case of the M3 technology model, falls into

udział tej kategorii w „stratach” jest ze względów obiektywnych zrozumiały. Straty i zróżnicowanie oddziaływań w pozostałych analizowanych kategoriach wynikające ze stosowania rozpatrywanych modeli technologii wzbogacania węgla są niewielkie w porównaniu ze stratami w kategorii zasoby. Można jednak przewidywać, że w całym cyklu życia straty w tych kategoriach jako wynik utylizacji węgla w sektorach energetycznym i komunalnym są bardziej znaczące.

„Praca finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji oraz Ministerstwa Gospodarki i Pracy wykonana w ramach realizacji projektu celowego - zamawianego nr PCZ 001-25.”

the loss category “resources”. Such a considerable portion of this category in the “losses” is, for objective reasons, comprehensible. The losses and differentiation of the effects in the remaining analysed categories, resulting from the use of model coal cleaning technologies considered, are negligible as compared to the losses in the category “resources”. However, one can predict that, in the whole life cycle, the losses in these categories, in consequence of utilisation of coal in the power engineering and municipal sectors are more significant.

Literatura — References

1. Białecka B. 1999: *Proecological combustion technology. Int. Conference on ecological use of coal in energy sector, Clean Coal, Praha*
2. Kulczycka J. 2001: *Ekologiczna ocena cyklu życia (LCA) nową techniką zarządzania środowiskowego. Wyd. Instytut GSMiE PAN*
3. Czaplicka, K. 2002: *Zastosowanie oceny cyklu życia (LCA) w ekobilansie kopalni. Główny Instytut Górnictwa, Katowice*
4. Goedkoop M., Effting S., Collingnon M.: *The Eco indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers, Second edition, Pre Consultants, April 2000*
5. Goedkoop M., Spriensma R.: *The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report, Second edition Pre Consultants, April 2000*
6. PN-EN ISO 14040:2000 *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Zasady i struktura*
7. PN-EN ISO 14041:2002 *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Określenie celu i zakresu oraz analiza zbioru*
8. PN-EN ISO 14042:2002 *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Ocena wpływu cyklu życia*
9. PN-EN ISO 14043:2002 *Zarządzanie środowiskowe – Ocena cyklu życia – Interpretacja cyklu życia*
10. Sablik J. 1991: *Technologia czystego węgla - amerykański program przeciwdziałania skażeniu powietrza powstającego w wyniku utylizacji węgla w energetyce. Przegląd Górniczy 5*
11. Sablik J. 2002: *Przyroda go nie skąpi... Technologia czystego węgla – geneza i rozwój. Ekoprofit nr 1, (61)*
12. SETAC 1993: *Guidelines for Life Cycle Assessment: A :Code of Practice” Brussels, SETAC Brochure*
13. Ściążko M., Dreszer K. 1995: *Ecological Fuels – state and perspective in Poland. Meeting of experts on clean coal technologies. Central Mining Institute, Katowice - Szczyrk*
14. www.pre.nl