



ORGANIZACJA PROCESU ZARZĄDZANIA SYSTEMEM WYWOZU I UNIESZKODLIWIANIA ODPADÓW MEDYCZNYCH W SKALI WOJEWÓDZTWA PODLASKIEGO

Maria Walery

Politechnika Białostocka

ORGANIZATION OF THE SYSTEM MANAGEMENT AND DISPOSAL OF MEDICAL WASTE IN PODLASKIE REGION

Streszczenie

Modelowanie systemów gospodarki odpadami medycznymi związane jest z symulacją rzeczywistych procesów jednostkowych składających się na rozwiązania logistyczne systemów sortowania, zbiórki, transportu i unieszkodliwiania odpadów.

W niniejszej pracy przedstawiono możliwość wykorzystania modelu optymalizacyjnego systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych w wersji dynamicznej, który umożliwia projektowanie najkorzystniejszych pod względem ekonomicznym systemów gospodarki tego rodzaju odpadami.

W artykule opisano badania optymalizacyjne, których celem była analiza wpływu parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie spalania (wvp) oraz zmiany jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych (K_{ij}) na wartość wskaźnika ekonomicznej efektywności (E). Badania przeprowadzono na przykładzie analizy systemu gospodarowania odpadami medycznymi w województwie podlaskim.

Zakres badań operacyjnych wykonany w ramach studium optymalizacji został podzielony na dwa etapy obliczeń optymalizacyjnych przy założonych parametrach technicznych i ekonomicznych systemu. W pierwszym etapie wygenerowano najniższy koszt funkcjonowania analizowanego systemu, natomiast w drugim - ustalono wpływ parametrów wejściowych systemu, tj. stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów oraz jednostkowego kosztu transportu odpadów na wskaźnik ekonomicznej efektywności i strukturę przestrzenną systemu.

Słowa kluczowe: system gospodarki odpadami medycznymi, koszt funkcjonowania systemu, wskaźnik ekonomicznej efektywności, struktura przestrzenna systemu

Summary

Modeling of waste management systems is related to the simulation of the actual unit processes that make up the functioning logistics systems sorting, collection, transportation and disposal of waste.

The paper presents the model of medical waste management system in the dynamic version which allows to design the most economically effective systems of medical wastes disposal and utilization.

This paper describes the optimization study aimed to analyze the impact of the parameter describing the degree of reduction of medical waste in the process of combustion (*wwp*) and changes in the unitary cost of transportation of medical waste (K_{ij}) on the value of the indicator of economic efficiency (*E*). The study was conducted on the example of the analysis of medical waste management system in Podlaskie Region.

The range of operating tests created in the optimization study, was divided into two stages of optimization calculations for the adoption with the assumed technical and economic parameters. The first one generated the lowest operating cost of the scheme, while in the second stage the impact of the input parameters of the system was determined, i.e. the influence of reduction of amount of medical waste in the incineration process, and the unitary cost of transporting waste on the rate of economic efficiency and spatial structure of the system.

Key words: *medical waste management system, system functioning costs, economic efficiency index, spatial structure of the system*

WSTĘP

Problematyka gospodarowania odpadami medycznymi z uwagi na ich zagrożenia epidemiologiczne, toksykologiczne i sanitarne jest niezmiernie ważna i aktualna. Przy stale rosnącej ilości produkowanych odpadów medycznych, rosnących kosztach ich transportu oraz unieszkodliwienia w połączeniu z trudną sytuacją finansową sektora usług medycznych, system gospodarowania odpadami wymaga poszukiwania działań racjonalizatorskich ukierunkowanych na oszczędności finansowe. Działania te powinny dotyczyć wszelkich obszarów funkcjonowania systemu gospodarki odpadami medycznymi, poprzez dążenie do minimalizacji powstawania odpadów, właściwą ich segregację, minimalizację zużycia surowców i energii oraz ograniczania kosztów związanych z wywozem i unieszkodliwianiem odpadów [Askarian i in. 2010, Chaerul i in. 2008, Gaska 2007]. Problem jest szczególnie istotny ze względu na skalę i powszechność występowania.

System gospodarowania odpadami medycznymi na obszarze województwa podlaskiego wymaga wprowadzenia wzmożonych działań oraz rozwiązań systemowych, tj. technicznych i organizacyjnych w odniesieniu do źródeł powstawania odpadów, sposobów gromadzenia, identyfikacji i kontroli transportu oraz procesów i technologii przetwarzania odpadów, które zagwarantują unieszkodo-

dliwienie odpadów przy jednoczesnym spełnieniu standardów ochrony środowiska i sanitarnego bezpieczeństwa.

Przeprowadzenie analizy rozwiązań systemowej gospodarki odpadami jak również optymalizacji procesów jednostkowych i uwzględnienie wzajemnego powiązania wszystkich elementów systemu, zachodzących procesów i korelacji, stwarza możliwość uporządkowania i zrjonalizowania gospodarki odpadami medycznymi na wskazanym obszarze.

Celem pracy jest analiza wpływu parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie spalania (wwp) oraz jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych (K_{ij}) na wartość wskaźnika ekonomicznej efektywności (E). Badania optymalizacyjne przeprowadzono na przykładzie analizy systemu gospodarowania odpadami medycznymi w województwie podlaskim.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

W niniejszej pracy wykorzystano model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych (Biedugnis i in. 2001, 2003), jak również program komputerowy MRGO+ (Model Regionalnej Gospodarki Odpadami), będący jego implementacją (Podwójci 2000). Model został przez Autorkę zweryfikowany i zaadaptowany na potrzeby proponowanego modelu optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych.

W niniejszej pracy przedstawiono model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych w wersji dynamicznej.

Ogólne założenia modelu matematycznego odnoszą się do określenia:

– zbioru źródłowych obszarów gromadzenia odpadów I, przy czym każdemu obszarowi odpowiada określona powierzchnia terenu A_i ($i \in I$), na której znajduje się zbiór Z źródeł powstawania odpadów. Każdy i -ty źródłowy obszar gromadzenia ($i \in I$) reprezentowany jest przez i -ty źródłowy punkt gromadzenia odpadów, leżący w środku ciężkości pola o powierzchni A_i o współrzędnych długości i szerokości geograficznej;

– zbioru możliwych lokalizacji obiektów systemu W, przy czym każdej lokalizacji odpowiada określona niezbędna powierzchnia terenu A_w ($w \in W$), każda w -ta lokalizacja obiektu reprezentowana jest przez punkt leżący w środku ciężkości powierzchni terenu A_w o współrzędnych wyznaczonych, tak jak dla źródłowych obszarów gromadzenia odpadów;

– zbioru P, stosowanych lub możliwych do zastosowania w określonym czasie wstępnych i końcowych procesów unieszkodliwiania odpadów;

– zbioru J, obiektów pośrednich, w których występują samodzielne lub skojarzone w ciąg technologiczny wstępne i wtórne procesy unieszkodliwiania odpadów;

– zbioru K, końcowych obiektów, w których występują procesy finalnego unieszkodliwiania odpadów lub pozostałości ze wstępnych lub wtórnych procesów przeróbki odpadów w obiektach pośrednich;

– zbioru T, tras wywozu odpadów ze źródłowych obszarów gromadzenia do obiektów oraz przewóz odpadów pomiędzy obiektami systemu.

Przy ustalonych założeniach ogólnych modelu przyjmuje się następujące szczegółowe założenia techniczne:

– nagromadzenie odpadów w poszczególnych i -tych źródłowych obszarach gromadzenia dla określonego czasu lub horyzontu planowania t jest wielkością znaną, równą masie odpadów ze wszystkich źródeł powstawania odpadów występujących na terenie A_i ,

$$G_{it} = \sum_{(A_i)_z} q_{zt} \quad (1)$$

– każdy obiekt pośredni lub końcowy z procesem występującym samodzielnie lub z procesami skojarzonymi w ciąg technologiczny, oprócz finalnego składowania, ma określoną maksymalną przepustowość Q_{max} , wyrażoną w jednostce (t/rok),

– każdy obiekt z procesem finalnym, jakim jest deponowanie odpadów na składowisku, posiada określoną powierzchnię terenu, wyrażoną w jednostce (ha-m),

– każdy obiekt lub zbiór obiektów zlokalizowanych wspólnie ma przypisaną maksymalną liczbę pojazdów samochodowych dowożących lub wywożących odpady. Występuje niezależnie od ograniczenia maksymalnej przepustowości obiektu bądź powierzchni terenu w przypadku składowiska,

– czas przejazdu pomiędzy źródłowymi punktami gromadzenia i występującymi w systemie obiektami oraz pomiędzy tymi obiektami, określany jest na podstawie badań terenowych wykonanych na każdej trasie,

– horyzont planowania t w ujęciu dynamicznym zostaje podzielony na n okresów modelowych, założoną liczbą lat m_j dla każdego j -tego okresu, stąd liczba lat dla horyzontu planowania wynosi:

$$t = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{m_j} t_{ji} \quad (2)$$

– eksploatacja każdego obiektu rozpatrywana w ujęciu dynamicznym dopuszcza wybudowanie obiektu o przepustowości przekraczającej potrzeby w momencie podjęcia eksploatacji, pod warunkiem pełnego jej wykorzystania w następnych okresach modelowych, oraz uzyskania najmniejszego kosztu funkcjonowania wariantu rozwiązania systemu. Dodatkowym warunkiem dopuszczenia do wybudowania obiektu, którego przepustowość nie będzie wykorzystana w okresie podjęcia eksploatacji jest zapewnienie, że w

żadnym z następných okresów faktyczna przepustowość tego obiektu nie obniży się w stosunku, do której podjęto eksploatację.

Do badań optymalizacyjnych przyjęto modelowy region, tj. obszar województwa podlaskiego, który może być uznany za reprezentatywny dla innych regionów w tej części kraju. Dane wejściowe niezbędne do opisu proponowanych wariantów systemu gospodarki odpadami medycznymi zostały zebrane i opracowane w ramach przeprowadzonych badań analityczno-faktograficznych. Przeprowadzone studium optymalizacyjne [Walery 2009] oparte na rzeczywistych danych dotyczących zarówno parametrów technicznych jak i wielkości ekonomicznych pozwala na uogólnienie uzyskanych wyników i ich implikację dla innych zbliżonych regionów.

Na terenie rozpatrywanego obszaru woj. podlaskiego, uwzględniając powyższe założenia oraz uwarunkowania środowiskowe, wytypowano do analizy 18 źródeł powstawania i gromadzenia odpadów - szpitali, cztery obiekty pośrednie - spalarnie odpadów medycznych odpowiednio OP1 (Suwałki), OP2 (Łomża), OP3 (Białystok) i OP4 (Hajnówka) oraz cztery obiekty końcowe (odpowiednio OK1, OK2, OK3 i OK4) - zlokalizowane na terenie spalarni odpadów medycznych – składowiska do czasowego przetrzymywania odpadów poprocesowych z procesu termicznego przekształcania odpadów.

Zakres badań operacyjnych wykonany w ramach studium optymalizacji, został podzielony na kolejne etapy w celu przedstawienia możliwości zaproponowanego modelu:

Etap I – obejmował obliczenia optymalizacyjne, przy przyjęciu ustalonych w koncepcji parametrów technicznych i ekonomicznych.

Przebieg 1 wykonany w ramach tego etapu był jednocześnie przebiegiem porównawczym, względem którego były porównywane otrzymane rozwiązania.

Etap II – obejmował szereg dodatkowych przebiegów mających na celu ustalenie wpływu wybranych parametrów wejściowych modelu na koszt funkcjonowania systemu wyrażony wskaźnikiem ekonomicznej efektywności (E) oraz strukturę przestrzenną systemu (układ lokalizacji obiektów i związanych z nimi tras wywozu odpadów).

Dane wejściowe, które były brane pod uwagę to:

- parametry ekonomiczne opisujące system (koszty jednostkowe transportu odpadów, wskaźnik inflacji i dyskonta),
- parametry ekonomiczne opisujące obiekty systemu (koszty kapitałowe i eksploatacyjne),
- wielkość redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażona w postaci współczynnika wyjściowego procesu – wwp [%],
- czas planowanego horyzontu czasowego t (czas trwania badań modelowych).

Obliczenie wskaźnika ekonomicznej efektywności przeprowadzono metodą przedstawioną w pracach Biedugnis i Cholewińskiego [Biedugnis, Cholewiński 1987, 1992] uwzględniając w modelu dynamicznym inflację i dyskon-

towanie rocznych nakładów kapitałowych i kosztów bieżących w poszczególnych okresach modelowych, i tak:

- nakłady kapitałowe przedstawiają wartość rocznej raty umorzeniowej z uwzględnieniem dyskontowania i inflacji, wyrażonej w postaci części stałej nakładów kapitałowych F_N i części zmiennej S_N dla danego okresu modelowego,
- koszty bieżące przedstawiają wartość rocznych kosztów eksploatacji (bez amortyzacji środków trwałych) z uwzględnieniem dyskontowania i inflacji, wyrażonej w postaci części stałej kosztów bieżących F_E i części zmiennej S_E dla danego okresu modelowego.

Obliczenie kosztu jednostkowego przeprowadzono metodą zaprezentowaną w pracach Biedugnis i Cholewińskiego (Biedugnis et al., 1987, 1992) przy uwzględnieniu cen i opłat bieżących. Koszt jednostkowy wywozu odpadów medycznych dla przyjętych warunków technicznych i eksploatacyjnych wynosi $K_{ij} = 9,57$ zł, a po przeliczeniu na jednostkę wyrażającą koszt przewozu 1 tony w ciągu 1 minuty $K_{ij(k)} = 1,33$ zł/t/min.

WYNIKI BADAŃ

Zakres obliczeń optymalizacyjnych został zrealizowany w następujących przebiegach:

Etap I - przebieg 1 – przebieg jak w koncepcji z uwzględnieniem następujących parametrów: czas trwania modelowych okresów odpowiednio $t_1 = 5$ i $t_2 = 15$ lat, jednostkowy koszt transportu odpadów medycznych w I i II okresie modelowym odpowiednio: 1,33 oraz 0,44 zł/t/min, wielkość redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażona w postaci współczynnika wyjściowego procesu $w_{wp} = 25\%$.

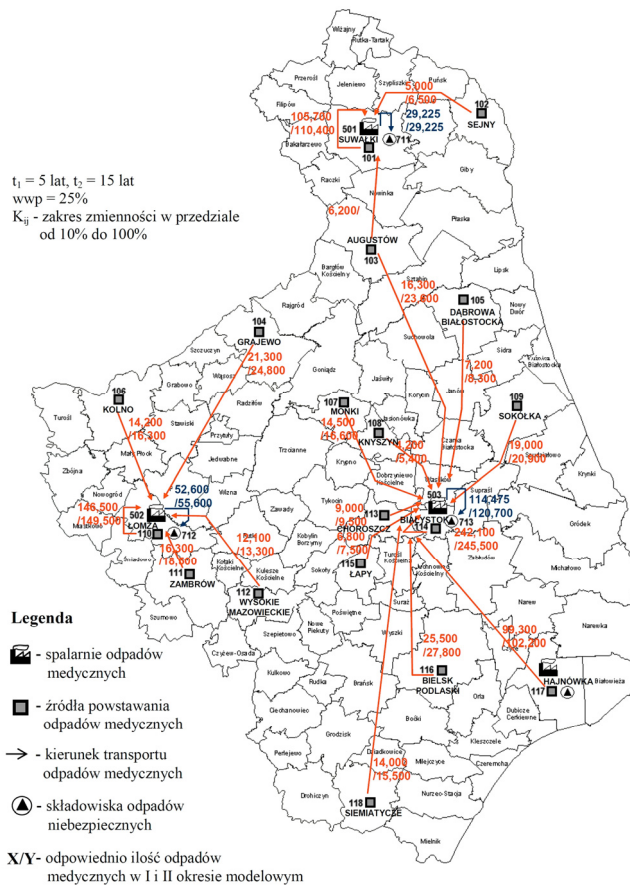
Etap II - w przebiegach 2-5 – badano wpływ zmiany parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów, wyrażonego w postaci współczynnika wyjściowego – w_{wp} [%] oraz dodatkowo zmiany jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych w I i II okresie badań modelowych w przedziale zmienności od 10 do 100% na uzyskanie optymalnego rozwiązania.

Zakres obliczeń optymalizacyjnych dla Etapu II (przebiegi 2-5) przedstawiono w tabeli 1.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych dla przebiegu 1 (Etap I) z założonych wstępnie na modelowym obszarze 26 obiektów systemu (18 – źródeł powstawania odpadów medycznych, 4 – spalarnie, 4 – składowiska odpadów niebezpiecznych, 55 – możliwych tras przewozu odpadów), zostały wybrane w I i II okresie modelowym odpowiednio: 3/3 spalarnie, 3/3 składowiska oraz 21/21 tras przewozu odpadów, minimalizując w ten sposób koszt funkcjonowania systemu. Układ lokalizacji obiektów, ilości transportowanych odpadów i związanych z nimi tras wywozu przedstawiono na rys. 1.

Tabela 1. Zakres obliczeń optymalizacyjnych dla przebiegów 2-5 w poszczególnych okresach badań modelowych**Table 1.** The scope of optimization calculations for 2-5 runs in periods of the model

Nr przebiegu	Wielkość redukcji ilości odpadów w obiektach pośrednich wwp [%]	Jednostkowy koszt transportu odpadów K_{ij} [%]	Jednostkowy koszt transportu odpadów w poszczególnych okresach badań modelowych K_{ij} [zł/t/min]	
			I okres badań	II okres badań
2	25	10	1,46	0,48
3	25	25	1,66	0,55
4	25	50	2,00	0,66
5	25	100	2,66	0,88

**Rysunek 1.** Układ lokalizacji obiektów systemu gospodarki odpadami medycznymi oraz tras transportu odpadów na obszarze modelowego regionu przebieg I**Figure 1.** Localization of facilities in medical waste management system and transportation routes in model – route option I

Dla przebiegu 1 w tabeli 1 przedstawiono poziomy działalności przerób-
czych w obiektach pośrednich i końcowych w poszczególnych okresach badań
modelowych.

Tabela 1. Poziomy działalności przerób-
czych w obiektach pośrednich i końcowych
w poszczególnych okresach modelowych dla przebiegu 1 na obszarze modelowego
regionu [t/rok]

Table 1. The level activity processing of medial and final objects for 1 run [ton/year]

Obiekty systemu	Nazwa procesu	Poziomy działalności przerób- czych [t/rok]	Czas trwania badań modelowych I=5 lat, II=15 lat
OP1	spalanie	116,900	I
OP1	spalanie	116,900	II
OP2	spalanie	210,400	I
OP2	spalanie	222,400	II
OP3	spalanie	457,900	I
OP3	spalanie	482,800	II
OK1	składowanie	29,225	I
OK1	składowanie	29,225	II
OK2	składowanie	52,600	I
OK2	składowanie	55,600	II
OK3	składowanie	114,475	I
OK3	składowisko	120,700	II

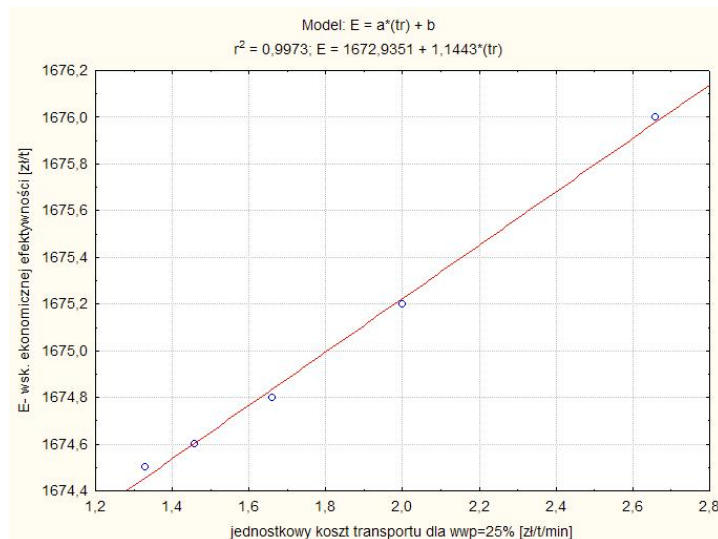
Dla przebiegów 2-5 przy założonych współczynniki wyjściowym wwp
= 25 % i 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycy-
nych w I i II okresie badań modelowych (z 1,46 zł/t/min do 2,66 zł/t/min)
– struktura przestrzenna systemu gospodarki odpadami medycznymi nie uległa
zmianie w stosunku do przebiegu 1 (wwp = 25%), nie ma też zmian dotyczących
ilości transportowanych odpadów po określonych trasach przewozu, ani też
zmian poziomów działalności przerób-
czych w poszczególnych obiektach w I i II
okresie modelowym.

Wartość wskaźnika ekonomicznej efektywności E przy założonych wwp
= 25% oraz 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów dla
przebiegów 2-5 nieznacznie wzrosła (o 0,9%) z 1674,50 zł/t do 1676 zł/t.

Na rysunku 2 przedstawiono wartość uzyskanego wskaźnika ekonomicznej
efektywności E dla przebiegów 2-5 w zależności od stopnia redukcji ilości
odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów (wwp
= 25%) oraz 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów.

Przy założonych wwp = 25% oraz 10-100% wzroście jednostkowego
kosztu transportu odpadów dla przebiegów 2-5 uzyskano wzrost kosztu funkcjo-
nowania systemu (wskaźnika ekonomicznej efektywności E):

$$E = 1672,9351 + 1,1443*(tr) \quad [zł/t] \quad (2)$$



Rysunek 2. Zależność wskaźnika ekonomicznej efektywności E od stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów oraz jednostkowego kosztu transportu odpadów, dla wwp = 25%

Figure 2. Dependence of economic efficiency index (E) on the extent of medical waste incineration process and the transport unitary cost of waste, for wwp=25%.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaprezentowany w artykule model optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych może być stosowany w projektowaniu zintegrowanego systemu gospodarki odpadami medycznymi na wybranym obszarze, opartego na współdziałaniu różnych technologii przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów medycznych. Model umożliwia wybór optymalnego rozwiązania systemu organizacji wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych przy minimalizacji ponoszonych kosztów eksploatacyjnych oraz nakładów inwestycyjnych i jednoczesnym spełnieniu efektu środowiskowego.

Struktura systemu gospodarki odpadami medycznymi warunkowana jest w głównej mierze przez współczynnik wyjściowy procesu – wwp. Wzrostowi tego współczynnika odpowiada wzrost ilości odpadów poprocesowych kierowanych na składowisko. Dalszą konsekwencją jest wzrost kosztu funkcjonowania systemu, wyrażonego wskaźnikiem ekonomicznej efektywności E. Przy założonych ograniczeniach terenu w obiektach końcowych - składowiskach, koniecznością staje się uzyskanie jak najmniejszego współczynnika wyjściowego procesu, poprzez wybór odpowiedniej technologii unieszkodliwiania odpadów medycznych.

Wzrost jednostkowego kosztu transportu odpadów nie powoduje zmiany struktury układu lokalizacji obiektów systemu oraz sieci działalności transportowych, ze względu na małą ilość transportowanych odpadów z poszczególnych źródeł powstawania odpadów zarówno w I jak i II okresie badań modelowych.

BIBLIOGRAFIA

- Askarian M., Heidarpour P., Assadian O., 2010. *A total quality management approach to healthcare waste management in Namazi Hospital, Iran*. Waste Management, Vol.30, pp. 2321-2326.
- Biedugnis S., Cholewiński J. *Program do wyboru optymalnego wariantu gospodarki odpadami w skali regionu*. Biuletyn IGPIK nr 10, Warszawa 1987, s. 34-39.
- Biedugnis S., Cholewiński J. *Optymalizacja gospodarki odpadami*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1992, 340 ss.
- Biedugnis S., Podwójci P., Smolarkiewicz M. *Regional optimizing Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization in dynamic Contest*, Mat. XXII Międzynarodowego Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2001, Płock 2001, s. 34-39.
- Biedugnis S., Podwójci P., Smolarkiewicz M. *Optymalizacja gospodarką odpadami komunalnymi w skali mikro i makroregionalnej*, Wyd. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003, 96 ss.
- Chaerul M., Tanaka M., Shekdar A.V., 2008: *A system dynamics approach for hospital waste management*. Waste Management, Vol.28, pp. 442-449.
- Gaska K., 2007. *Analiza systemów gospodarki odpadami medycznymi z wykorzystaniem rachunku ekonomicznego*. Paliwa z odpadów t. VI, Wyd. Helion.
- Podwójci P., 2000. *Modele optymalizacyjne systemów wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych na przykładzie regionu plockiego*. Dysertacja, Politechnika Warszawska, 131 ss.
- Walery M., 2009. *Systemowe rozwiązanie gospodarki odpadami medycznymi na przykładzie województwa podlaskiego*, dysertacja, Politechnika Białostocka, Białystok, 204 ss.

*Artykuł powstał w ramach realizacji pracy S/WBiIS/02/2011
finansowanej przez MNiSW*

Maria Walery
Katedra Systemów Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka
ul. Wiejska 45A
15-351 Białystok