

Maria Walery

WARIANTOWANIE ROZWIĄZAŃ SYSTEMU FUNKCJONOWANIA GOSPODARKI ODPADAMI MEDYCZNYMI NA PRZYKŁADZIE WOJEWÓDZTWA PODLASKIEGO

Maria Walery, dr inż. – Politechnika Białostocka

adres korespondencyjny:

Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Systemów Inżynierii Środowiska

ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

e-mail: m.walery@pb.edu.pl

PREPARING OF VARIANTS OF THE MANAGEMENT SYSTEM SOLUTIONS OF MEDICAL WASTE IN PODLASKIE REGION

SUMMARY: 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 (w_{wp}) 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.

KEY WORDS: medical waste management system, system functioning costs, economic efficiency index, spatial structure of the system

Wstęp

Odpady medyczne stwarzają coraz większe zagrożenie dla środowiska naturalnego oraz zdrowia i życia ludzi, głównie ze względu na zawartość chorobotwórczych drobnoustrojów: bakterii, prątków, wirusów, grzybów i pasożytów. W wyniku tego mogą one stanowić źródło infekcji, czyli zakażeń zarówno wewnątrzszpitalnych, jak i zewnątrzszpitalnych. Problematyka gospodarowania odpadami medycznymi, czyli realizacja prawidłowej ich zbiórki, segregacji, transportu i unieszkodliwiania stanowi obecnie jeden z najbardziej istotnych problemów służb sanitarno-epidemiologicznych. Przy stale rosnącej ilości wytwarzanych odpadów medycznych, rosnących kosztach ich transportu oraz unieszkodliwiania w połączeniu z trudną sytuacją finansową rynku usług medycznych system gospodarki odpadami wymaga poszukiwania działań strategicznych ukierunkowanych na oszczędności finansowe. Efektywna alokacja działań powinna odnosić się do możliwych obszarów funkcjonowania systemu gospodarki odpadami medycznymi poprzez dążenie do minimalizacji kosztów eksploatacyjnych, epidemiologicznych i ekologicznych funkcjonowania systemu przy maksymalizacji skuteczności procesu ich unieszkodliwiania¹. Niezmiernie ważny jest optymalny dobór poszczególnych procesów składowych oraz zespołu obiektów systemu, czyli:

- pozyskiwania i gromadzenia odpadów medycznych;
- systemu transportu odpadów z uwzględnieniem działalności transportowych;
- przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów medycznych.

System gospodarki odpadami medycznymi jest systemem otwartym, ponieważ oddziałuje na otoczenie oraz przyjmuje informacje z niego płynące. Struktura systemu wskazuje na istnienie relacji zachodzących pomiędzy poszczególnymi elementami systemu i otoczenia, które utrzymują jego funkcjonowanie w strukturze dynamicznej. W ujęciu systemowym przeprowadzenie analizy rozwiązań gospodarki odpadami, czyli optymalizacji procesów jednostkowych, zidentyfikowanie wzajemnego powiązania wszystkich elementów systemu, zachodzących wzajemnych interakcji, stwarza możliwość podjęcia szeregu działań zmierzających do uporządkowania gospodarki odpadami medycznymi.

¹ O. Apaydin, M. T. Gonullu, *Route optimization for solid waste collection: Trabzon (Turkey) case study*, „Global Nest Journal” 2007 t. 9, nr 1, s. 6-11; M. Askarian, P. Heidarpoor, O. Assadian, *A total quality management approach to healthcare waste management*, in: *Namazi Hospital, Iran*, „Waste Management” 2010 t. 30, s. 2321-2326; M.E. Birpinar, M.S. Bilgili, T. Erdoğan, *Medical waste management In Turkey: a case study of Istanbul*, „Waste Management” 2009 t. 29, s. 445-448; M. Chaerul, M. Tanaka, A. V. Shekdar, *A system dynamics approach for hospital waste management*, „Waste Management” 2008 t. 28, s. 442-449; K. Gaska, *Analiza systemów gospodarki odpadami medycznymi z wykorzystaniem rachunku ekonomicznego*, t. 6, *Paliwa z odpadów*, Wyd. Helion, Gliwice 2007; K. Gaska, *Modelowanie zintegrowanych systemów gospodarki odpadami z wykorzystaniem metodologii zorientowanej obiektowo*, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012; M. Walery, *Systemowe rozwiązanie gospodarki odpadami medycznymi na przykładzie województwa podlaskiego*, dysertacja, Białystok 2009.

Celem pracy jest analiza wpływu parametru opisującego stopień redukcji ilości odpadów medycznych w procesie spalania (wvp) 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.

Model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych w wersji dynamicznej

W niniejszej pracy wykorzystano model optymalizacyjny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych², jak również program komputerowy MRGO+ (Model Regionalnej Gospodarki Odpadami), będący jego implementacją³. Model został przez autorkę zweryfikowany i zaadaptowany na potrzeby proponowanego modelu optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych.

Ogólne założenia modelu matematycznego systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych w wersji dynamicznej 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;

² S. Biedugnis, J. Cholewiński, *Program do wyboru optymalnego wariantu gospodarki odpadami w skali regionu*, „Biuletyn IGPIK” 1987 nr 10, Warszawa 1987, s. 34-39; S. Biedugnis, J. Cholewiński, *Optymalizacja gospodarki odpadami*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1992; S. Biedugnis, P. Podwójci, M. Smolarkiewicz, *Regional optimizing Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization Model for Systems of Municipal Waste Disposal and Utilization in dynamic Contest*, Materiały XXII Międzynarodowego Sympozjum im. Bolesława Krzysztofika AQUA 2001, Płock 2001; S. Biedugnis, P. Podwójci, M. Smolarkiewicz, *Optymalizacja gospodarką odpadami komunalnymi w skali mikro- i makroregionalnej*, Wyd. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2003.

³ P. Podwójci, *Modele optymalizacyjne systemów wywozu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych na przykładzie regionu płockiego*, dysertacja, Warszawa 2000.

- 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 przewozu odpadów pomiędzy obiektami systemu.

Przy ustalonych założeniach ogólnych modelu przyjmuje się następujące szczególne 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 liczbę 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 następnych okresów faktyczna przepustowość tego obiektu nie obniży się w stosunku do której podjęto eksploatację.

Do badań optymalizacyjnych przyjęto modelowy region, czyli 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 optymalizacyjne⁴, 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 województwa podlaskiego, uwzględniając powyższe założenia oraz uwarunkowania środowiskowe, wytypowano do analizy 18 źródeł powstawania i gromadzenia odpadów – szpitale, 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 procesowych 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. W pierwszym etapie wygenerowano najniższy koszt funkcjonowania analizowanego systemu.
- Przebieg 1 wykonany w ramach tego etapu był jednocześnie przebiegiem porównawczym, względem którego były porównywane otrzymane rozwiązania.
- Etap II – obejmował wpływ parametrów wejściowych systemu, czyli stopnia redukcji ilości odpadów medycznych w procesie termicznego przekształcania odpadów oraz jednostkowego kosztu transportu odpadów, na wskaźnik ekonomicznej efektywności i strukturę przestrzenną systemu.

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 Biedugnisia i Cholewińskiego⁵, uwzględniając w modelu dynamicznym inflację i dyskontowanie rocznych nakładów kapitałowych i kosztów bieżących w poszczególnych okresach modelowych:

- nakłady kapitałowe przedstawiają wartość rocznej raty umorzeniowej z uwzględnieniem dyskontowania i inflacji wyrażonej w postaci części stałej nakładów kapitałowych FN i części zmiennej SN dla danego okresu modelowego;

⁴ M. Walery, *Systemowe rozwiązanie...*, op. cit.

⁵ S. Biedugnis, J. Cholewiński, *Program do wyboru...*, op. cit.; S. Biedugnis, J. Cholewiński, *Optymalizacja gospodarki...*, op. cit.

- 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 Biedugnisia i Cholewińskiego⁶ przy uwzględnieniu cen i opłat bieżących. Koszt jednostkowy wywozu odpadów medycznych dla przyjętych warunków technicznych i eksploatacyjnych wynosi $K_{ij} = 9,57$ PLN, a po przeliczeniu na jednostkę wyrażającą koszt przewozu 1 tony w ciągu 1 minuty $K_{ij(k)} = 1,33$ PLN/t/min.

Studium badań optymalizacyjnych

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 PLN/t/min, wielkość redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażona w postaci współczynnika wyjściowego procesu $wwp = 40\%$.
- 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 – wwp [%], 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 rysunku 1.

Dla przebiegu 1 w tabeli 2 przedstawiono poziomy działalności przeróbczych w obiektach pośrednich i końcowych w poszczególnych okresach badań modelowych.

Dla przebiegów 2-5 przy założonym współczynnikiem wyjściowym $wwp = 40\%$ i 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów medycznych

⁶ Ibidem.

Tabela 1
Zakres obliczeń optymalizacyjnych dla przebiegów 2-5 w poszczególnych okresach badań modelowych

Nr przebiegu	Wielkość redukcji ilości odpadów w obiektach pośrednich wwp [%]	Jednostkowy koszt transportu odpadów K_v [%]	Jednostkowy koszt transportu odpadów w poszczególnych okresach badań modelowych K_v [PLN/t/min]	
			I okres badań	II okres badań
2	40	10	1,46	0,48
3	40	25	1,66	0,55
4	40	50	2,00	0,66
5	40	100	2,66	0,88

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2
Poziomy działalności przeróbczych w obiektach pośrednich i końcowych w poszczególnych okresach modelowych dla przebiegu 1 na obszarze modelowego regionu [t/rok]

Obiekty systemu	Nazwa procesu	Poziomy działalności przeróbczych [t/rok]	Czas trwania badań modelowych I=5 lat, II=15 lat
OP1	spalanie	140,400	I
OP1	spalanie	148,800	II
OP2	spalanie	210,400	I
OP2	spalanie	222,400	II
OP3	spalanie	434,400	I
OP3	spalanie	450,900	II
OK1	składowanie	56,160	I
OK1	składowanie	59,520	II
OK2	składowanie	84,160	I
OK2	składowanie	88,960	II
OK3	składowanie	173,760	I
OK3	składowisko	180,360	II

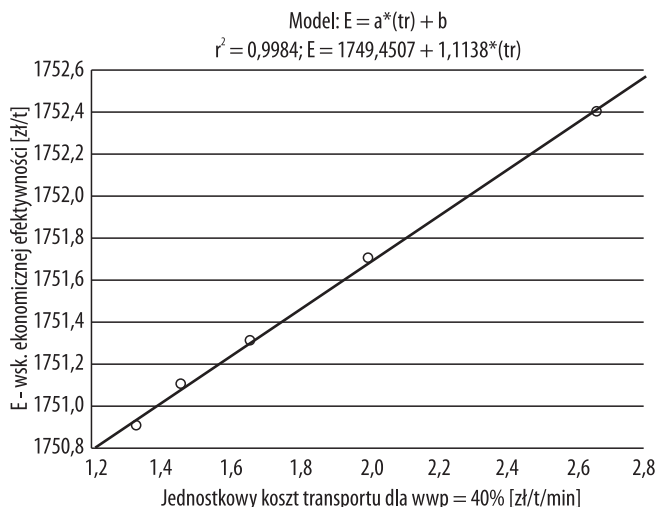
Źródło: opracowanie własne.

w I i II okresie badań modelowych (z 1,46 PLN/t/min do 2,66 PLN/t/min) – struktura przestrzenna systemu gospodarki odpadami medycznymi nie uległa zmianie w stosunku do przebiegu 1 (wwp = 40%), nie ma też zmian dotyczących ilości transportowanych odpadów po określonych trasach przewozu, ani też zmian poziomów działalności przeróbczych w poszczególnych obiektach w I i II okresie modelowym.

Przy założonych wwp = 40% oraz 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów dla przebiegów 2-5 nastąpił nieznaczny wzrost (o 0,9‰) wartości wskaźnika ekonomicznej efektywności E – z 1750,90 PLN/t do 1752,40 PLN/t.

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 = 40%



Źródło: opracowanie własne.

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 = 40%) oraz przy 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów.

Przy założonych wwp = 40% oraz 10-100% wzroście jednostkowego kosztu transportu odpadów dla przebiegów 2-5 uzyskano wzrost kosztu funkcjonowania systemu (wskaźnika ekonomicznej efektywności E):

$$E = 1749,4507 + 1,1138*(tr) \text{ [PLN/t]} \quad (3)$$

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule model optymalizacji systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadów medycznych służy do wielowariantowej analizy realizacji systemowej gospodarki odpadami medycznymi na wybranym obszarze. Kluczowe w obszarze wariantowania rozwiązań systemu zarządzania gospodarką odpadami medycznymi jest odwzorowanie poszczególnych klas obiektów, co pozwala na ujawnienie struktury systemu oraz zidentyfikowanie relacji oraz interakcji między poszczególnymi elementami systemu. Analiza wariantów modelowania systemu może być rozpatrywana w układzie zintegrowanym, opartym na współdziałaniu różnych technologii przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów medycznych.

Model matematyczny systemu wywozu i unieszkodliwiania odpadami medycznymi umożliwia analizę zmian wariantów rozwiązywania systemowej gospodarki odpadami przy zmianach parametrów wejściowych systemu, czyli:

- parametrów ekonomicznych opisujących system (koszty jednostkowe transportu odpadów, wskaźnik inflacji i dyskonta);
- parametrów ekonomicznych opisujących obiekty systemu (koszty kapitałowe i eksploatacyjne);
- wielkości redukcji odpadów medycznych w obiektach pośrednich systemu wyrażonej w postaci współczynnika wyjściowego procesu – wwp [%];
- ograniczenia przepustowości obiektów pośrednich (spalarni);
- czasu planowanego horyzontu t (czas trwania badań modelowych).

Analiza wariantowa prowadzona jest w odniesieniu do stanu istniejącego, czyli wariantu bazowego, co ma szczególne znaczenie przy wyznaczaniu wskaźnika ekonomicznej efektywności i wyborze wariantu najlepszego spośród analizowanych przy minimalizacji kosztów eksploatacyjnych funkcjonowania systemu i spełnieniu wymagań ekologicznych.

Struktura systemu gospodarki odpadami medycznymi determinowana jest głównie przez współczynnik wyjściowy procesu – wwp. Wzrostowi tego współczynnika odpowiada wzrost ilości odpadów poprocesowych kierowanych na składowisko. Dalszą konsekwencją jest wzrost kosztu funkcjonowania systemu. Stąd też koniecznością staje się uzyskanie jak najmniejszego współczynnika wyjściowego procesu poprzez dobór odpowiedniej technologii i procesów składowych przetwarzania i unieszkodliwiania odpadów medycznych.

Artykuł powstał w ramach realizacji pracy S/WBiŚ/02/2011 finansowanej przez KBN.