

# PRÓBA OKREŚLENIA POTENCJALNYCH OBSZARÓW ZASTOSOWANIA BADAŃ OPERACYJNYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

## THE ATTEMPT OF QUALIFY OF POTENTIAL AREA IN ADOPTIONS OPERATIONS RESEARCH IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

*Mieczysław Połoński*

Katedra Technologii i Organizacji Prac Wodnych i Melioracyjnych  
Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska  
SGGW w Warszawie

### Wstęp

Coraz szerszy wachlarz zagadnień naukowych i technicznych jaki obejmują zagadnienia związane z inżynierią środowiska zmusza do poszukiwania coraz efektywniejszych metod ich rozwiązywania. Prowadzone badania w tym zakresie znacznie poszerzają naszą wiedzę w tym obszarze zainteresowań, jednak celowe wydaje się również zwrócenie uwagi na znane metody badawcze stosowane dotychczas w innych obszarach nauki, które mogą być przydatne do rozwiązywania zagadnień związanych z inżynierią środowiska. W referacie skupiono się na bardzo interesującej metodologii formułowania, analizowania i rozwiązywania problemów badawczych jakimi są badania operacyjne.

Próbując zdefiniować badania operacyjne zauważamy, że przytaczane definicje przez poszczególnych autorów są zazwyczaj bardzo ogólne. H Wagner [1980] w swoim obszernym i znanym podręczniku badania operacyjne definiuje „jako naukową metodę rozwiązywania problemów z zakresu podejmowania decyzji kierowniczych.” Z kolei P.M. Morse i G.E. Kimball [Mitchell 1977] traktują badania operacyjne „jako naukową metodę zasilającą jednostki podejmujące decyzje w ilościowe ujęcie analizowanej lub syntetyzowanej sytuacji lub zjawiska, stanowiących przedmiot zainteresowania tych jednostek”. Sięgając do definicji wypracowanych przez polskich badaczy stwierdzamy, że W. Grudzewski [1985] uważa, że „w praktyce zarządzania badania operacyjne można traktować jako

naukową teorię, która umożliwi budowę modeli na podstawie identyfikacji sytuacji rzeczywistych opisywanych wielkościami oraz rozwiązywaniu modeli w celu podejmowania efektywnych decyzji ze względu na przyjęte kryteria techniczne, ekonomiczne i społeczne.” Zupełnie inne podejście prezentuje T. Kasprzak [1974,1987], który definiuje badania operacyjne poprzez podanie charakterystycznych dla tej dyscypliny nauki wyróżników. Jako podstawowe wymienia trzy:

- przedmiot badań - decyzje na poziomie strategicznym i taktycznym
- stosowane metody - modelowanie decyzji
- sposób podejścia do problemu - analiza systemowa modelowania i przygotowania decyzji

### **Cechy charakterystyczne badań operacyjnych**

Rozpatrując przytoczone powyżej definicje oraz szereg innych, zawartych w literaturze, można wyróżnić charakterystyczne cechy, które z jednej strony wyróżniają badania operacyjne na tle innych dyscyplin naukowych, z drugiej zaś precyzyjnie ukazują sposób podejścia do rozwiązywanych problemów i stosowane narzędzia. Najważniejsze z nich to:

- ukierunkowanie na problemy związane z podejmowaniem decyzji
- konstruowanie i operowanie modelami odwzorowującymi badany system
- możliwość oceny działania na podstawie mierzalnych kryteriów
- operowanie modelami matematycznymi
- poszukiwanie rozwiązań optymalnych ze względu na przyjęte kryterium oraz analiza wielokryterialna
- powiązanie z elektroniczną techniką obliczeniową
- silne związki z problemami praktycznymi
- interdyscyplinarny charakter stosowanych rozwiązań (wykorzystywanie elementów teorii decyzji, teorii i inżynierii systemów, matematyki stosowanej, ekonometrii, cybernetyki, informatyki)

Jedną z najważniejszych cech badań operacyjnych, związana nierozdzielnie z tą dyscypliną i stanowiącą jej istotę, jest operowanie modelami. O ile bardzo ogólna definicja modelu oznacza reprezentację badanego zjawiska w postaci innej niż postać, w jakiej występuje ono w rzeczywistości, to w badaniach operacyjnych szczególną pozycję zajmuje model matematyczny, rozumiany jako model, który za pomocą reguł matematycznych sprowadza opis działania systemu do opisu jego cech mierzalnych. Nie wdając się w dyskusję co do metodologii budowy tego rodzaju modeli, warto jednak zwrócić uwagę na trzy podstawowe

wymagania jakie powinien spełnić model stosowany w badaniach operacyjnych, a mianowicie powinien on [Wagner 1980]:

- precyzyjnie wyrazić istotę problemu decyzyjnego
- prawidłowo odwzorować związki pomiędzy poszczególnymi elementami modelowanego systemu i jego otoczeniem
- być wolnym od nagromadzenia nieistotnych szczegółów

Taki sposób podejścia do formułowania modeli wynika z faktu, że zbudowany model nie jest tylko przedmiotem pewnych ogólnych rozważań na temat powiązań pomiędzy jego elementami i otoczeniem bez podania związków funkcyjnych, lecz w dalszej fazie badań stosowany jest do obliczeń optymalizacyjnych, prowadzących do wyboru realnego rozwiązania. Silne powiązanie praktycznych problemów z ich modelami zmusza zespół badawczy do konstruowania takich modeli, które dadzą się opisać formułami matematycznymi, zalgorytmizować i prowadzić na nich eksperymenty numeryczne. Konstruowanie takiego modelu zazwyczaj rozkłada się na trzy etapy [Kasprzak 1987]:

- określenie problemu decyzyjnego
  - dochodzenie do modelu konceptualnego
  - formalizacja modelu konceptualnego do postaci modelu matematycznego
- Model, który nie uda się doprowadzić do takiej postaci, w badaniach operacyjnych uważany jest za mało przydatny i odrzuca w dalszych badaniach.

Tak szerokie posługiwanie się prawidłowo skonstruowanymi modelami uzasadnione jest w pełni korzyściami, jakie można dzięki temu osiągnąć, między innymi:

- ułatwia zrozumienie działania modelowanego systemu
- umożliwia przeprowadzenie powtarzalnych empirycznych obserwacji i wyciągnięcie z nich odpowiednich wniosków
- pozwala na sprawdzenie teoretycznych przekonań o działaniu systemu
- pozwala na skupienie uwagi nad określonymi elementami modelu i ich wpływie na zachowanie całego modelowanego systemu
- przyspiesza wykonanie wymaganych analiz
- określa i ułatwia testowanie pożądanych modyfikacji systemu
- umożliwia badanie zmienności wybranych zmiennych decyzyjnych na zachowanie całego modelowanego systemu
- jest tańsze od prowadzenia badań bezpośrednio na systemie

Budowa modelu, który spełni stawiane mu wymagania jest trudne, długotrwałe i nie zawsze musi zostać uwieńczone sukcesem. Dotyczy to szczególnie modeli, które muszą zostać nasycone konkretnymi związkami funkcyjnymi na podstawie których, będą dokonywane eksperymenty obliczeniowe. Budując i przeprowadzając analizę modelu, warto zwrócić uwagę na zagrożenia, jakie temu

towarzyszą. Jednym z najczęściej spotykanych i opisanych w literaturze jest nadmierne rozszerzanie możliwości wykorzystania modelu lub interpretacji wyników przeprowadzonych na nim eksperymentów. Budując model należy jasno zdefiniować jego zasięg i powiązania z otoczeniem. Wszelkie próby ekstrapolacji uzyskanych wyników poza określony zasięg lub odnośnienie modelu do sytuacji nieadekwatnych w sensie genezy analizowanego zjawiska będą łączyły się z ryzykiem uzyskania błędnych wyników. Z drugiej strony istnieje groźba nieuzasadnionego zawężenia i uproszczenia związków jakie w rzeczywistości zachodzą między poszczególnymi elementami modelu, co również w konsekwencji może prowadzić do zbyt uproszczonych wniosków i oceny badanego zjawiska. Znalezienie właściwego i jednorodnego stopnia szczegółowości w całym modelu wydaje się jednym z najtrudniejszych zadań jakie należy rozwiązać budując dowolny model. Nie wolno również zapominać, że przystępując do tej złożonej i często długotrwałej pracy, nie posiadamy gwarancji, że czas i wysiłek włożony w budowę modelu zwróci się w postaci użytecznego wyniku. Ryzyko takie zawsze istnieje, jednak nie powinno być argumentem do odrzucenia modeli jako narzędzia w prowadzonych badaniach, gdyż w wielu wypadkach jest to najkrótsza droga do uzyskania zadawalających wyników.

Na zakończenie tego bardzo skrótego przeglądu metodyki, jaką posługują się badania operacyjne, warto zwrócić na podstawowe klasy rozwiązań zadań decyzyjnych. Autorzy wyróżniają trzy podstawowe metody:

- metody matematyczne generujące najczęściej jedno rozwiązanie optymalne
- metody heurystyczne (symulacyjne)
- metody mieszane algorytmiczno-heurystyczne (np. metoda podziału i ograniczeń)

Jasne jest, że najdokładniejsze wyniki uzyskuje się stosując pierwszą grupę metod tzn. metody matematyczne. Niestety, nie we wszystkich przypadkach możliwe jest ich zastosowanie, gdyż najczęściej łączy się to z wprowadzaniem do obliczeń szeregu uproszczeń lub znacznego rozbudowania modelu i prowadzonych na nim obliczeń. Metody heurystyczne i mieszane powstały w wyniku poszukiwań rozwiązań, które kładą większy nacisk nie na optymalność rozwiązania, ale na lepsze dopasowanie modelu do rzeczywistości. W takiej sytuacji często zadawaliśmy się rozwiązaniem suboptymalnym, ale uzyskanym relatywnie szybko i tanio. Ważne jest, aby uzyskany w ten sposób wynik nie odbiegał istotnie od rozwiązania dokładnego, choć precyzyjne określenie granicy dopuszczalnego błędu najczęściej następuje z dużymi trudnościami.



## **Zastosowanie elementów inżynierii systemów do sformułowania i rozwiązania sytuacji decyzyjnej**

Jedną z bardziej interesujących cech badań operacyjnych z praktycznego punktu widzenia, jest wypracowanie metodologii świadomego i poprawnego formułowania i rozwiązania sytuacji decyzyjnych. Bardzo dobrze scharakteryzował to T. Biliński [1983]: „Chodzi o to, aby w sposób metodologiczny ustalić syntetycznie i całościowo sytuację określonego problemu, a następnie ją właściwie sformalizować w celu dalszego jej analizowania i rozwiązania w sposób gwarantujący zintegrowanie modelu z istniejącą sytuacją”. Procedura systemowego rozwiązania problemu inżynierskiego polega na podzieleniu go na wzajemnie powiązane ze sobą etapy oraz podporządkowaniu ich wszystkich jasno zdefiniowanym na początku kryteriom oceny. Najczęściej wyróżnia się następujące etapy [Michnowski 1980]:

- zdefiniowanie problemu
- zaprojektowanie systemu wartościowania (kryteria ekonomiczne, techniczne, społeczne)
- wariantowe koncepcje rozwiązania podjętego problemu
- analiza wariantów i decyzja wyboru rozwiązania
- rozwinięcie wybranej (i ewentualnie alternatywnej) koncepcji rozwiązania
- optymalizacja wybranego rozwiązania
- ocena uzyskanych wyników w świetle przyjętych kryteriów
- decyzja o wdrożeniu wyników i/lub przekazanie wyników do dalszego rozwiązania

Jednym z najważniejszych etapów jest pełne i wnikliwe zdefiniowanie rozwiązywanego problemu. Tylko w tym jednym etapie rozpatruje się takie zagadnienia jak:

- zrozumiały i w pełni adekwatny do problemu tytuł pracy
- zhierarchizowane cele do osiągnięcia (najczęściej przedstawiane w postaci drzewa celów)
- bezpośredni i pośredni obszar objęty problemem (wydzielenie elementów systemu i jego otoczenia)
- uzasadnienie potrzeby podjęcia problemu
- generalne kierunki możliwych rozwiązań (analiza stanu wiedzy)
- potrzeby jakie mają być zaspokojone po wdrożeniu wyników
- ograniczenia nałożone na rozwiązanie problemu
- bezpośredni i pośredni adresaci opracowania wynikowego
- zadania pomocnicze do rozwiązania

- inne, np. dodatkowi specjaliści, których należy zaangażować przy rozwiązaniu problemu

Na przykładzie tylko tego jednego etapu można zauważyć, jak wielką rolę w inżynierii systemów przykłada się do właściwego metodologicznie podejścia do opracowywanego zagadnienia. Wymusza ono wręcz rzetelne i szerokie potraktowanie danego zagadnienia.

### **Specyfika i potencjalne obszary modelowania sytuacji decyzyjnych w inżynierii środowiska**

Inżynieria środowiska tak jak wiele innych dyscyplin posiada swoją specyfikę, wpływającą na zakres i sposób budowy modeli decyzyjnych oraz możliwości poszukiwania ich rozwiązania. Specyfika ta wyływa z prób modelowania często bardzo złożonych procesów, gdyż zachodzących na styku dwóch diametralnie różnych systemów: przyrodniczego i wynikającego z działalności ludzkiej. W związku z tym występuje szereg trudności w formułowaniu sytuacji decyzyjnych i budowie niezbędnych do analiz modeli. Wśród nich można wymienić między innymi:

- konieczność uwzględniania czynników niewymiernych lub podlegających ocenie subiektywnej
- częste występowanie sytuacji konfliktowych w trakcie formułowania modelu i/lub interpretacji wyników
- znaczna komplikacja modeli odwzorowujących działanie systemów naturalnych
- trudności z formalizacją matematyczną modeli konceptualnych
- losowy charakter wartości zmiennych decyzyjnych
- częsty brak dostatecznie długich ciągów obserwacyjnych danych do parametryzacji współczynników przy zmiennych decyzyjnych
- brak jednoznacznych kryteriów optymalizacji lub konieczność stosowania analizy wielokryterialnej

Znając metodykę rozwiązywania zagadnień stosowaną w badaniach operacyjnych, zakres problemowy jakim zajmuje się inżynieria środowiska oraz jej specyfikę, można spróbować określić potencjalne obszary jej wykorzystania w tym zakresie. Zastosowanie badań operacyjnych uważa się za celowe i przynoszące największe korzyści przy podejmowaniu decyzji strategicznych. Do takich zagadnień w inżynierii środowiska można zaliczyć np.:

- ustalanie lokalizacji sztucznych zbiorników wodnych
- rozrząd wody w dużych regionach przemysłowych i rolniczych
- określanie wydajności, stosowanych technologii i lokalizacji oczyszczalni ścieków w aglomeracjach miejskich i przemysłowych
- sterowanie gospodarką wodną na pojedynczych zbiornikach i ich kaskadach

- określania priorytetów inwestowania w obiekty związane z ochroną środowiska przy ograniczonych zasobach finansowych

Niezależnie od występowania szeregu trudności istnieje również wiele obszarów, w których można stosować badania operacyjne na szczeblu taktycznym. Można tu wymienić takie zastosowania jak np.

- wyznaczenie pojemności i lokalizacji gminnych składowisk odpadów
- określanie wydajności oczyszczalni ścieków w aspekcie regionalnych planów zagospodarowania przestrzennego
- podział lokalnych środków finansowych na inwestycje, modernizację i konserwację obiektów melioracyjnych pod kątem maksymalizacji długoterminowych efektów ekonomicznych z działalności rolniczej na rozpatrywanym obszarze
- opracowanie harmonogramów realizacji poszczególnych obiektów
- rozrząd wody na obiektach nawadnianych w warunkach okresowych niedoborów wody
- bilansowanie przerzutu mas ziemnych przy równoczesnym sporządzaniu wykopów i nasypów na dużym obszarze

### **Ograniczenia i trudności oraz perspektywy zastosowaniu badań operacyjnych w inżynierii środowiska**

Analizując udział badań operacyjnych w praktyce inżynierskiej w zakresie inżynierii środowiska w Polsce należy stwierdzić, że metody te są dotychczas stosowane rzadko i w ograniczonym zakresie. Były próby zastosowania ich na szerszą skalę (np. problem lokalizacji i wykorzystania zbiorników wodnych w rejonie Górnej Noteci w drugiej połowie lat siedemdziesiątych, udział w programach PR-7 „Kształtowanie i wykorzystanie zasobów wodnych” oraz programie „Wisła” [Findeisen 1985]), jednak zasięg praktycznego ich oddziaływania był niewielki. Podejmowane były też próby zastosowania badań operacyjnych na poziomie konkretnych przedsięwzięć inwestycyjnych (taktycznym) [Krajewski 1993], jednak ich zasięg jest nadal bardzo ograniczony. Stoi to w wyraźnej sprzeczności z możliwościami ich aparatu badawczego oraz korzyściami ekonomicznymi jakie przynosi ich wdrożenia w krajach wysoko rozwiniętych. Złożyło się na ten stan wiele przyczyn, wśród których można dostrzec między innymi:

- problemy związane ze złożonością budowanych modeli i omawianą wcześniej specyfiką inżynierii środowiska
- brak zainteresowania badaniami operacyjnymi na wyższych szczeblach administracji odpowiedzialnych za inżynierię środowiska

- brak w przeszłości instrumentów ekonomicznych zachęcających do poszukiwania i wdrażania metod zwiększających efektywność przedsiębiorstw wykonawczych
- nieznanostwo tych metod wśród kadry kierowniczej i inżynierskiej zajmującej się inżynierią środowiska
- nadużywanie w latach siedemdziesiątych badań operacyjnych jako „naukowej podkładki” do forsowania z góry przesądzonych decyzji, lub odrzucanie wyników niezgodnych z takimi decyzjami [Findeisen 1985]
- niedobór środków finansowych na prowadzenie szeroko zakrojonych badań nad wdrożeniem metodyki i osiągnięć badań operacyjnych w rozwiązywaniu zagadnień z zakresu inżynierii środowiska

Zmieniająca się sytuacja gospodarcza kraju pozwala bardziej optymistycznie oceniać możliwości wdrażania badań operacyjnych w praktyce administracyjnej i inżynierskiej. Przemawiają za tym między innymi następujące argumenty:

- powstaje liczna grupa średnich i dużych firm (prywatnych lub z udziałem prywatnego kapitału), która będzie poszukiwała efektywnych metod zarządzania i podejmowania decyzji w zakresie inwestowania swoich środków finansowych
- coraz częściej decyzje o sposobie inwestowania w zakresie inżynierii środowiska podejmują władze lokalne, znacznie bardziej zainteresowane trafnym podejmowaniem decyzji inwestycyjnych oraz ich efektywnością
- wiedza na temat wybranych metod badań operacyjnych coraz częściej jest przedmiotem zajęć na uczelniach technicznych i rolniczych (choć trudno uznać stan istniejący w tym zakresie za wystarczający)

Dużą rolę w propagowaniu tych metod może odegrać popularyzacja konkretnych problemów badawczych, w których rozwiązania zostały opracowane z udziałem badań operacyjnych.

### Podsumowanie

1. W zakresie inżynierii środowiska w Polsce badania operacyjne stosowane są rzadko i w ograniczonym zakresie.
2. Istnieje szereg zagadnień w inżynierii środowiska, zarówno na szczeblu strategicznym jak i taktycznym, gdzie badania operacyjne stanowią właściwą metodologię ich rozwiązania.
3. Modele budowane dla celów inżynierii środowiska często charakteryzują się znaczną złożonością i probabilistycznym charakterem wielu zmiennych decyzyjnych.



4. Istotną rolę w analizowaniu sytuacji decyzyjnych w inżynierii środowiska odgrywają metody symulacyjne i heurystyczne.
5. Specyfika rozwiązywanych zagadnień w inżynierii środowiska często ogranicza jednoznaczność kryterium optymalizacji, a nawet może powodować występowanie sprzeczności kryteriów lokalnych, co wskazuje na konieczność operowania w takich przypadkach analizą wielokryterialną.

### Literatura

- BILIŃSKI T., GOCZEK W. 1983. *Budownictwo systemowe*. PWN Warszawa
- BŁAŻEWICZ J., CELLARY W., SŁOWIŃSKI R., WĘGLARZ J. 1983. *Badania operacyjne dla informatyków*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa
- KASPRZAK T. 1987. *Badania operacyjne i systemowe teorie decyzji*. Katedra Cybernetyki i Badań Operacyjnych. Wydział Nauk Ekonomicznych UW. Warszawa
- KASPRZAK T. 1974. *Badania operacyjne w nowoczesnym zarządzaniu*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa
- KRAJEWSKI K. 1993. *Metody optymalizacji w inżynierii środowiska*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa
- MICHNOWSKI Z. 1980. *Organizacja i planowanie budowy T.II Elementy inżynierii systemów*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa
- MITCHELL G.H. 1977. *Badania operacyjne, metody i przykłady*. Wydawnictwa Naukowo - Techniczne. Warszawa
- PRACA ZBIOROWA POD RED. W. FINDEISENA 1985. *Analiza systemowa - Podstawy i metodologia*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa
- PRACA ZBIOROWA POD RED. W. GRUDZEWSKIEGO 1985. *Badania operacyjne w organizacji i zarządzaniu*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa
- WAGNER H.M. 1980. *Badania operacyjne*. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne. Warszawa

### Summary

**The attempt of qualify of potential area in adoptions operations research in environmental engineering.** In this study determination of use selected method of operations rescarch in environmental engineering are presented. The first part of this paper contain different definitions operations research, their tasks and particularly method. Next to pay attention to possibility of use systems engineering to the planning, analysis and resolving science problems. Further section to give a lecture

on environmental engineering, their fields of applications and problems with management decisions. Finally, to describe a potential possibility use of operations research method in environmental engineering, showing restrictions, problems and prospects.

Mieczysław Połoński  
Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska SGGW  
Katedra Technologii i Organizacji Prac Wodnych i Melioracyjnych  
02-787 Warszawa  
ul. Nowoursynowska 166  
email: POLONSKI@ALPHA.SGGW.WAW.PL