

WOJCIECH MILL

LESŁAW JASTRZĘBSKI

ALINA SKOWRONEK

RUDOLF BUJOK

INSTYTUT KSZTAŁTOWANIA  
ŚRODOWISKA ODDZ. KATOWICE

HENRYK KASZA

ZAKŁAD BIOLOGII WÓD  
PAN KRAKÓWMETODA DŁUGOTERMINOWEGO PROGNOZOWANIA EUTROFIZACJI  
W ZBIORNIKU RETENCYJNYM

Streszczenie. Przedstawiono matematyczny model prognozowania eutrofizacji wody w zbiorniku retencyjnym na przykładzie zbiornika Goczałkowice. Model przeznaczony jest do kontroli jakości wody w zbiorniku poprzez sterowanie wielkością wprowadzanych ładunków zanieczyszczeń.

1. Wstęp

Jakość wody w zbiornikach retencyjnych przeznaczonych do zaopatrywania w wodę do picia jest systematycznie kontrolowana. Zagrożenia jakości wody wykazywane przez kontrolę są na bieżąco likwidowane. Najgroźniejszym zjawiskiem pogarszającym jakość wody i utrudniającym prawidłowe funkcjonowanie zbiorników wodnych jest eutrofizacja /przeżyźnianie/, prowadząca do gwałtownych, masowych zakwitów glonów. W naturalnych warunkach proces ten zachodzi bardzo powoli, jednak wskutek działalności gospodarczej człowieka jest on znacznie przyspieszany. Przykłady wielu zbiorników wodnych w Polsce dowodzą groźnego wzrostu tempa eutrofizacji, głównie wskutek zasilania tych zbiorników wodami obciążonymi substancjami pożywkowymi, takimi jak fosfor, azot, substancjami organicznymi itp., pochodzącymi z przedsiębiorstw komunalnych i przemysłowych. Uważa się, że stosowanie dotychczasowych metod likwidacji skutków eutrofizacji przez np. miedziowanie wody, zbiorników, ma charakter tylko doraźny. Większą gwarancję rozwiązania problemu powinna dać metoda eliminacji przyczyn eutrofizacji, a więc redukcji ładunków substancji pożywkowych u źródeł ich powstawania. W takim przypadku potrzebna jest metoda oceny reakcji wody zbiornika na podejmowane działania w zakresie gospodarki wodno-ściekowej w zlewni rzeki zasilającej zbiornik. Opracowano model matematyczny odwzorowujący stan troficzności zbiornika dla różnych warunków obciążania jego

wody substancjami biogennymi. Model wdrożono na przykładzie zbiornika Goczałkowice.

2. Określenie czynnika limitującego postęp eutrofizacji  
i charakterystyka stopnia troficzności wód zbiornika  
Goczałkowice

Zasada określania kontrolującej roli substancji pożywkowych oparta jest na funkcjonalnej zależności pomiędzy produktywnością roślin, a stężeniem tych substancji. Według tej zasady rozwój glonów jest regulowany przez substancję będącą w mniejszym stężeniu. Według licznych autorów [1-3], gdy stosunek wagowy N:P w wodzie jest mniejszy niż 15:1, azot jest prawdopodobnym czynnikiem limitującym. W przeciwnym wypadku, tj. gdy N:P jest większy od 15:1, fosfor reguluje rozwój glonów. W oparciu o wyniki przeprowadzonych badań stwierdzono, że w okresie czerwiec - październik 1984 r. średni stosunek azotu do fosforu w zbiorniku Goczałkowice wynosił 20:1. Można więc uznać, że czynnikiem limitującym rozwój glonów w tym zbiorniku jest fosfor. W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów fosforu ogólnego przeprowadzonych w zbiorniku Goczałkowice przez Stację Doświadczalną PAN w latach 1973-1984. Przedstawione wyniki pomiarów ukazują czasową zmienność stężeń fosforu ogólnego w zbiorniku, a tym samym zmienność stopnia jego troficzności.

Tabela 1

Średnioroczne stężenia fosforu ogólnego w centralnej  
strefie zbiornika Goczałkowice,  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$

	ZIMA	WIOSNA	LATO	JESIEŃ	ROK
1973	-	0,044	0,025	0,018	0,029
1974	0,025	0,027	0,036	-	0,029
1975	0,023	0,023	0,044	0,033	0,031
1976	-	0,033	0,041	0,009	0,028
1977	0,026	0,018	0,042	0,019	0,026
1979	-	0,048	0,055	0,015	0,039
1980	0,043	0,031	0,044	0,056	0,044
1981	0,044	0,051	0,040	0,082	0,054
1982	0,084	0,086	0,083	0,067	0,078
1983	-	0,037	0,095	0,126	0,086
1984	-	0,059	0,088	0,085	0,065

W centralnej części zbiornika obserwujemy systematyczny wzrost średnich rocznych stężeń fosforu ogólnego, przy czym od 1973 do 1981 r. poziom stężeń P-P odpowiada stanowi eutroficznemu, zaś od 1982 r. następuje wzrost stężeń fosforu ogólnego powyżej  $0,05 \text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  i zbiornik przechodzi w stan hypertroficzny.

Obserwowanemu wzrostowi trofii zbiornika towarzyszą odpowiedni spadek przezroczystości wody i wzrost stężenia chlorofilu "a".

Przyczyna wzrostu stopnia troficzności zbiornika staje się oczywista, gdy porównać ten wzrost ze wzrostem ładunków fosforu ogólnego wprowadzanego do zbiornika wodami rzeki Wisły i potoku Dajerka.

Doprowadzenie zbiornika do stanu hipertrofii nie powinno być mieć miejsca, a działania zapobiegawcze powinny być podjęte dużo wcześniej, bo już w połowie lat siedemdziesiątych. Uważa się, że reakcja na obecny stan zanieczyszczenia zbiornika musi być natychmiastowa, zwłaszcza z uwagi na jego istotną rolę gospodarczą.

### 3. Model eutrofizacji

Działania na rzecz osiągnięcia pożądanego stopnia troficzności wody zbiornika wymagają odpowiedzi na następujące pytania:

- jak będzie się zmieniać jakość wody zbiornika w odpowiedzi na różne warianty przedsięwzięć technologicznych podejmowanych wobec głównych źródeł zanieczyszczeń ?
- po jakim czasie oczekiwane zmiany jakości wody nastąpią ?

Odpowiedź na te pytania pozwoli na wybór rozwiązania problemu w sensie technicznym i ekonomicznym.

Jako metodę odwzorowania przemian fosforu ogólnego w wodzie i osadzie dennym zbiornika przyjęto modelowanie matematyczne. Wybrany model [4] przeznaczony jest do prognoz długoterminowych, dzięki czemu konstrukcją modelu można było oprzeć na założeniu, według którego złożone procesy rozwoju glonów, sedimentacji i uwalniania fosforu z osadów dennych przebiegają sumarycznie według reakcji pierwszego rzędu.

Tak uproszczona interpretacja zjawisk naturalnych w zbiorniku wodnym jest trudna do obrony z teoretycznego punktu widzenia, jednak praktyczne przeznaczenie modelu usprawiedliwia jej przyjęcie.

Stosowany model matematyczny jest układem dwóch równań różniczkowych, z których pierwsze opisuje czasowe zmiany stężenia fosforu ogólnego w wodzie zbiornika, a drugie w osadzie dennym.

$$\frac{dC}{dt} = \frac{M}{V} + \frac{K_2 C_s A}{V} - \frac{K_1 CA}{V} - \frac{CQ}{V} \quad /1/$$

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{K_1 CA}{V_s} - \frac{K_2 CA}{V_s} - \frac{K_3 - K_1 CA}{V_s} \quad /2/$$

gdzie:

C - stężenia fosforu ogólnego w wodzie,

$C_s$  - stężenia fosforu ogólnego w osadzie dennym,

t - czas,

M - ładunek fosforu ogólnego dopływający do zbiornika,

V - objętość zbiornika,

A - powierzchnia zbiornika,

Q - średni roczny odpływ wody ze zbiornika,

$K_1$  - współczynnik szybkości sedymentacji cząstkowej frakcji fosforu ogólnego do osadu,

$K_2$  - współczynnik szybkości uwalniania fosforu z osadów dennych,

$K_3$  - frakcja fosforu ogólnego w osadzie dennym, która nie bierze udziału w wymianie masy pomiędzy osadem dennym a wodą,

$V_s$  - objętość osadu dennego.

Równanie /1/ dotyczące zmian fosforu w wodzie uwzględnia zewnętrzne źródło fosforu, którym jest ładunek wprowadzany przez dopływ do zbiornika, wewnętrzne źródło, tj. osad dennym uwalniający fosfor do wody, stratę fosforu wskutek sedymentacji nierozpuszczalnej frakcji fosforu i stratę wskutek odpływu ładunku fosforu ze zbiornika.

W równaniu /2/, dotyczącym osadu dennego rozważa się dostawę fosforu do osadu wskutek sedymentacji, ubytek fosforu z osadu w związku uwalnianiem go do wody oraz stratę tej części fosforu, która przechodzi w formę trwale nierozpuszczalną.

Dla równań /1/ i /2/ uzyskano następujące rozwiązania szczególne:

$$C/t = /C_0 - D - B/ \exp /r_1 \cdot t/ + D \cdot \exp /r_2 \cdot t/ + B \quad /3/$$

$$C_s/t = \frac{1}{B} \left[ /C_0 - D \cdot B/ \cdot r_1 \cdot \exp /r_1 \cdot t/ + D \cdot r_2 \cdot \exp /r_2 \cdot t/ + H \cdot C_0 - \frac{1}{B} \right] \quad /4/$$

gdzie:

$$B = \frac{K_2 A M}{-V_s V} - \frac{K_1 A}{V_s} - \frac{K_2 A}{V} - \frac{K_1 K_3 A}{V_s} \quad /5/$$

$$U = \frac{B C_0 - /r_1 + H/ C_0 + B \cdot r_1 + \frac{1}{B}}{r_2 - r_1} \quad /6/$$

$$H = \frac{K_2 A + Q}{V} \quad /7/$$

$$r_1 = \frac{- /K_1 A + Q/ + \frac{K_2 A}{V_s} - /F/^{1/2}}{2} \quad /8/$$

$$r_2 = \frac{/K_1 A + Q/ + \frac{K_2 A}{V_s} + /F/^{1/2}}{2} \quad /9/$$

$$F = \frac{K_1 A}{V} + \frac{Q}{V} + \frac{K_2 A}{V_s} - 4 \left[ \frac{K_2 A}{V_s} - \frac{K_1 A}{V} + \frac{Q}{V} - \frac{K_2 A}{V} - \frac{K_1 A}{V_s} - \frac{K_1 K_3 A}{V_s} \right] \quad /10/$$

- $C_0$  - stężenie początkowe fosforu w wodzie,  
 $C_{s0}$  - stężenie początkowe fosforu w osadzie dennym.

#### 4. Estymacja parametrów modelu

Parametrami doświadczalnymi modelu są:

- $K_1$  - współczynnik szybkości sedymentacji cząstkowej frakcji fosforu ogólnego do osadu,  
 $K_2$  - współczynnik szybkości uwalniania fosforu z osadów dennych,  
 $K_3$  - frakcja fosforu ogólnego w osadzie dennym, która nie bierze udziału w wymianie masy pomiędzy osadem dennym a wodą.

Celem estymacji wartości tych parametrów prowadzone są badania laboratoryjne i terenowe na zbiorniku Goczałkowice.

Badania laboratoryjne prowadzone są w pięciu kolumnach doświadczalnych o specjalnej konstrukcji, w których w bezpośrednim kontakcie umieszczono osady denne ze zbiornika i wodę nadosadową. W określonych przedziałach czasowych mierzona jest kinetyka zmian stężeń fosforu ogólnego w wodzie i osadach. Cały, założony program badań nie został jeszcze zakończony, jednak dotychczasowe wyniki pozwoliły oszacować wartości parametrów modelu, które wynoszą:

$$K_1 = 29,49 \text{ m.rok}^{-1}$$

$$K_2 = 0,0009 \text{ m.rok}^{-1}$$

$$K_3 = 0,89$$

#### 5. Przykład numeryczny

Wykorzystując oszacowane wartości parametrów doświadczalnych, oraz obserwowane, średnie roczne ładunki fosforu ogólnego wprowadzane do zbiornika Goczałkowice, obliczono za pomocą modelu średnie roczne stężenia fosforu ogólnego w wodzie zbiornika dla lat 1973-1982. Wyniki obliczeń porównano ze stężeniami obserwowanymi w zbiorniku w tym samym okresie czasu /tabela 2/. Zmierzone stężenia fosforu ogólnego w zbiorniku Goczałkowice pochodzą z pomiarów wykonywanych przez Stację Doświadczalną PAN w Goczałkowicach.

Stężenia fosforu ogólnego uzyskane z obliczeń są średnio wyższe od stężeń zmierzonych, jednak tendencja zmian stężeń w rozważanym okresie czasu została odwzorowana dokładnie, co dowodzi poprawności konstrukcji modelu. Zawyżenie stężeń obliczonych względem zmierzonych wynika z niedokładności oszacowania wartości parametrów doświadczalnych, a zwłaszcza współczynnika szybkości sedymentacji  $K_1$ , którego wartość wydaje się być заниżona. Pełna weryfikacja modelu zostanie przeprowadzona po zakończeniu pełnego cyklu badań terenowych i laboratoryjnych.

Tabela 2

Obliczone i zmierzone stężenia fosforu ogólnego  
w zbiorniku Goczałkowice,  $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$

Rok	P-P zmierzone	P-P obliczone
1973	0,029	0,027
1974	0,029	0,038
1975	0,031	0,040
1976	0,028	0,038
1977	0,026	0,048
1978	0,035	0,046
1979	0,039	0,038
1980	0,044	0,054
1981	0,054	0,065
1982	0,078	0,067

## LITERATURA

- [1] Porcella D.S. at all: Comprehensive management of phosphorus water pollution. U.S. EPA, Washington, 1974.
- [2] Agricultural pollution of the Great Lake Basin. Bulletin 13020-07/71, 1971.
- [3] Mc Gauhey P.H. at all: Eutrophication of surface waters. Lake Tahoe Area Council, California, 1969.
- [4] Lorenzen M.W., D.J. Smith, L.V. Kimmel: A longterm phosphorus model for lakes. An Arbour Science, An Arbour, 1976.

## A METHOD OF LONG-TERM EUTROPHICATION PREDICTION IN RESERVOIRS

## Summary

A long-term prognostic model of impounded water eutrophication has been presented. The model has been applied to the Goczałkowice Reservoir in order to control nutrients concentrations.

МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭУТРОФИЗАЦИИ  
ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

## Резюме

Представлена математическая модель прогнозирования эутрофизации воды в водохранилище на примере водоема в Гочалковицах. Модель предназначена для контролирования качества воды в водохранилище, путём регулирования количества вводимых загрязнений.