

Wojciech LILL

INSTYTUT KSZTAŁTOWANIA ŚRODOWISKA
Oddział w Katowicach

MODEL TRANSPORTU ZAWIESIN W RZECIE SKANALIZOWANEJ

Streszczenie. Przedstawiono model wzdłużnych zmian stężeń i ładunków zawiesin w rzece skanalizowanej. Opracowaną procedurę obliczeniową zastosowano do prognozowania zmian stężeń i ładunków zawiesin w rzece Górnej Wiśle po jej planowanym skanalizowaniu. Model zweryfikowano w oparciu o kryteria turbulencyjnego transportu zawiesin w strumieniu.

Warunki hydrauliczne w systemie hydrologicznym, jaki tworzy rzeka skanalizowana, są mocno zróżnicowane. Pociąga to za sobą różnorodność form transportu zawiesin, od całkowitej sedymentacji po erozję koryta. Skutki sedymentacji zawiesin i erozji mają decydujący wpływ na trwałość i funkcjonowanie budowli hydrotechnicznych, oraz eksploatację drogi wodnej.

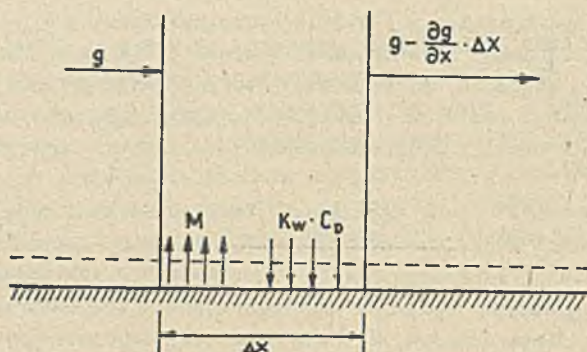
Obok problemów natury technicznej, zawiesiny stwarzają poważne zagrożenie jakości wody, szczególnie w rzekach skanalizowanych, gdzie procesy naturalnego samooczyszczania są ustawicznie zakłócone. Zawiesina jest jednym z głównych rodzajów zanieczyszczenia wód naturalnych nie tylko w sensie niepożądanych, zawieszonych cząstek mineralnych, lecz również jako nośnik innych zanieczyszczeń zaadsorbowanych na ich powierzchni. Do tego rodzaju zanieczyszczeń najczęściej należą związki organiczne, fosforowe i azotowe, metale ciężkie oraz pestycydy.

Tak więc ogólny pogląd na zmiany jakości wody oraz na prawidłowe funkcjonowanie drogi wodnej powinien opierać się na analizie zachowania się zawiesin wzdłuż biegu rzeki skanalizowanej. Dokładne odwzorowanie transportu zawiesin w rzece jest zagadnieniem niezwykle trudnym z uwagi na mnogość czynników wpływających na przebieg transportu. Opracowano szereg modeli matematycznych, opisujących zmiany stężeń zawiesin, opartych na mniejszej lub większej liczbie założeń upraszczających. Do najbardziej znanych należą modele Einsteina [1], Meyer-Peter i Müller [2], Bagnolda [3], Yalina [4], Grafa [5], Toffaleti [6] i Ackers i White'a [7].

Wszystkie z nich odnoszą się do konkretnego przekroju rzeki o określonych warunkach hydraulicznych i określonej frakcji zawiesin. Zadaniem przedstawianego modelu jest symulacja zmian stężeń zawiesin wzdłuż biegu rzeki skanalizowanej. Podobnie jak w cytowanych powyżej modelach matematycznych, interpretację transportu zawiesin oparto na podstawowym twierdzeniu, że w przepływie turbulentnym rozproszenie zawiesin w strumieniu

wody jest wynikiem wypadkowego działania energii wymiany turbulencyjnej utrzymującej cząsteczki stałe w rozproszeniu i siły grawitacji powodującej opadanie cząstek. W warunkach równowagi hydraulicznej ustala się równowagowy rozkład stężeń zawieszin oraz równowagowy ładunek zawieszin transportowany przez strumień wody [5,6,8,9]. Ustalony w odcinku rzeki układ równowagowy może być zakłócony przez zmianę warunków hydraulicznych lub przez wprowadzenie do rozważanego odcinka rzeki dodatkowego ładunku zawieszin.

Matematyczny opis zmian ładunku zawieszin wzdłuż biegu rzeki oparto o prosty, klasyczny bilans masowy [10], którego schemat przedstawiono na rys.1:



Rys.1 Bilans masowy zawieszin w elementarnym odcinku rzeki.

W elementarnej objętości wody o wymiarach $H \cdot \Delta x \cdot 1$, gdzie H jest głębokością strumienia, bilans masowy zawiesziny transportowanej przez strumień wody ma następującą postać:

$$\frac{\partial \int C \cdot dV}{\partial t} = \left[-\frac{\partial g}{\partial x} + (M - K_w \cdot C_D) \right] \Delta x \cdot 1 \quad /1/$$

W równaniu /1/ $\int C \cdot dV$ wyraża całkowitą masę zawiesziny w objętości $V = \Delta x \cdot H \cdot 1$, a g oznacza ładunek zawieszin odniesiony do jednostki szerokości strumienia i wyraża się wzorem:

$$g = c \cdot \bar{c} \cdot C_D \left(\frac{n}{0,042} \right)^{6r} \cdot H^{1-r} \quad /2/$$

W powyższych równaniach zastosowano następujące oznaczenia:

- x - współrzędna wzdłużna rzeki, m
 t - czas, d
 C - stężenie zawieszin, $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
 g - ładunek zawieszin, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 V - jednostkowa objętość wody, m^3
 M - ładunek zawieszin unoszony z jednostkowej powierzchni dna koryta, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 K_w - współczynnik szybkości redukcji stężenia zawieszin, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ - jego wartość jest odnoszona do szybkości sedymentacji v_s
 C_D - stężenie zawieszin w warstwie przydennej, $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$
 \bar{u} - średnia prędkość przepływu, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 n - współczynnik Manninga
 H - całkowita głębokość strumienia, m
 c - współczynnik doświadczalny

$$r = \frac{v_s \cdot R^{1/6}}{K \cdot \bar{u} \cdot 3,8 \cdot n} \quad /3/$$

gdzie:

- v_s - szybkość opadania cząsteczki, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
 K - stała von Karmana
 R - promień hydrauliczny, m

W warunkach ustalonych równanie /1/ przyjmuje postać:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = M - K_w \cdot C_D \quad /4/$$

lub po przekształceniu

$$\frac{\partial g}{\partial x} = M - \frac{K_w}{c \cdot \bar{u}} \left(\frac{0,042}{n} \right)^{6r} H^{r-1} \cdot g \quad /5/$$

Rozwiązanie równania /5/ przy warunku: dla $x = 0$; $g = g_0$ i dla $x = \infty$; $g = g_R$, daje następującą postać procedury wyznaczania wzdłużnych zmian ładunków zawieszin:

$$g/x/ = (g_0 - g_R) \dots + g_R \quad /6/$$

gdzie:

- $g/x/$ - ładunek zawieszin w przekroju x , $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 g_0 - początkowy ładunek zawieszin w punkcie $x=0$ m, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 g_R - równowagowy ładunek zawieszin, $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
 a - współczynnik charakteryzujący zdolność transportową strumienia dla określonej frakcji zawieszin o szybkości opadania v_s :

$$a = \frac{K_w}{c \cdot \bar{u}} \left(\frac{0,042}{n} \right)^{6r} \cdot R^{r-1} \quad /7/$$

Powyższą procedurę zastosowano do opracowania prognozy zmian stężeń zawiesin w rzece Górnej Wiśle po jej planowanym skanalizowaniu;

Radykalna zmiana warunków przepływu w rzece Wiśle, po przewidywanej kanalizacji jej koryta, wywoła zasadniczą zmianę w sposobie transportu zawiesin w rzece. W tabeli 1 przedstawiono wzdłużny profil stężeń i ładunków zawiesiny o wymiarach 0,05 - 0,1 mm, stanowiącej ponad 90 procentową frakcję zawiesin stwierdzoną w wyniku badań jakości wody rzeki Wisły;

Uzyskane z modelu wyniki obliczeń stężeń zawiesin weryfikowano w oparciu o dwa kryteria określające zachowanie się zawiesin w strumieniu wody. Pierwszym z nich jest wielkość naprężenia ścinającego τ wyrażanego wzorem:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot S \quad /8/$$

w którym:

- γ - ciężar właściwy wody z zawiesiną, $N \cdot m^{-3}$
- R - średni promień hydrauliczny w odcinku rzeki, m
- S - średni spadek zwierciadła wody w odcinku rzeki

Wartość krytyczna naprężenia ścinającego τ_c , powyżej którego następuje erozja cząstek o średnicy 0,05 - 0,1 mm, a poniżej transport i sedymentacja cząstek według Leviansky'ego [5] wynosi $0,081 N \cdot m^{-2}$, według Bogardi'ego [9] $0,095 N \cdot m^{-2}$ i według Neis'a [10] $0,097 N \cdot m^{-2}$. Wyznaczone wartości dla charakterystycznych przekrojów pomiarowych rzeki Małej Wisły po kanalizacji wynoszą odpowiednio:

- przekrój powyżej ujścia rzeki Gostynki $\tau = 1,98 N \cdot m^{-2}$
- przekrój poniżej ujścia rzeki Przemszy $\tau = 0,87 N \cdot m^{-2}$
- przekrój poniżej ujścia potoku Gromiec $\tau = 1,72 N \cdot m^{-2}$

Wyznaczone dla tych przekrojów wartości τ wielokrotnie przekraczają cytowane wartości τ_c co oznacza, że wskutek erozji i równoczesnego transportu, stężenia zawiesin powinny być wysokie w tych miejscach rzeki. Ukształtowanie wyznaczonego za pomocą modelu profilu stężeń zawiesin /tabela 1/ jest zgodne z przyjętym kryterium.

Drugim kryterium, według którego weryfikowano model była prędkość przepływu wody. Graf [5] podaje za Hjultstromem nomogram umożliwiający identyfikację obszarów erozji, sedymentacji i transportu równowagowego w funkcji średnicy cząstek i prędkości przepływu wody. Nomogram ten wskazuje, że frakcja cząsteczek o wymiarach 0,05 - 0,1 mm ulega erozji przy prędkości przepływu powyżej $0,3 m \cdot s^{-1}$, transportowi równowagowemu w granicach $0,06 m \cdot s^{-1}$ do $0,2 m \cdot s^{-1}$ i sedymentacji przy prędkościach

Tabela 1

Średnie ładunki i stężenia zawiesin w wodzie rzeki górnej Wisły po skanalizowaniu

Rzeka - śródlądowa droga wodna - koryto wspólne

Kilo- metr rzeki	Kilo- metr drogi wod- nej	Przekrój	Dopływ		Po wykonaniu drogi			
			ładunek stę- żenie g.s ⁻¹ g.m ⁻³	żenie, kość śred- nia m.s ⁻¹	ład- nek g.s ⁻¹	Stę- żenie g.m ⁻³	Długo- ść strefy całko- witej sedym.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
4,9	4,5	Poniżej rz.Gostynki			0,07	651,0	73,0	
		Powyżej zb.Bojszowy			0,07	28,4	3,2	400
4,6	4,6	Zb.wód sł.Bojszowy	1,5	30,0				
		Pon.zb.Bojszowy			0,07	29,8	3,3	
		Pow.F-ki "OMAG"			0,07	0,0	0,0	
3,5	3,5	F-ka "OMAG" Oświęcim	0,5	70,0				
		Pon.F-ki "OMAG"			0,07	0,5	0,0	
		Pow.pot.Goławieckiego			0,07	0,0	0,0	
3,0	3,0	Pot.Goławiecki /Centr.						
		Port Węglowy/	3,0	3,0				
		Pon.p.Goławieckiego			0,06	3,0	0,0	
0,0	0,0	Pow:rzeki Przemśzy			0,06	0,0	0,0	
		Rzeka Przemśza	1174,0	77,0				
		Pon.rzeki Przemśzy			0,15	1174,0	47,9	
1,8	1,8	Pow.rzeki Soły			0,15	680,3	27,9	
		Rzeka Soła	16,6	10,0				
		Pon.rzeki Soły			0,16	696,8	26,6	
		Pow.Z-dów Chem.						
		"Oświęcim"			0,16	552,0	21,0	
2,8	2,8	Z-dy Chem.Oświęcim	39,3	20,0				
		Pon.Z-dów Chem.			0,16	591,3	20,8	
4,5	4,5	Rozdział koryta na ka- nał "Dwory" i rzekę			0,16	362,5	12,8	
Rzeka								
		Powyżej jazu "Dwory"			0,14	362,5	12,8	
4,9		Jaz "Dwory"						
		Poniżej Jazu "Dwory"			0,7	312,4	12,7	
		Powyżej p.Gromiec			0,7	261,6	10,7	
7,5		Potok Gromiec	197,6	1996,0				
		Poniżej pot.Gromiec			0,7	509,9	23,9	
10,4		Pow.oczyszcz.Oświęcim						
		Czyszcz.Oświęcim	146,2	67,0				
		Pon.oczyszcz.Oświęcim						
10,7		Powyżej pot.Macocha						
		Potok Macocha	1,0	30,0				
		Poniżej pot.Macocha						
		Powyżej pot.Chechło			0,7	377,3	15,4	
14,0		Potok Chechło	83,4	96,0				
		Poniżej pot.Chechło			0,3	467,7	18,1	
		Pow.połączenia z kana- łem "Dwory"			0,3	245,1	9,5	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15,8	11,5	Kanał "Dwory"			0,18	245,1	9,5	
		Pon. połącz. z kan. "Dwory"			0,18	245,1	9,5	
		Powyżej pot. Bachorz			0,18	172,7	5,3	
18,2	13,0	Potok Bachorz	4,2	30,0				
		Poniżej pot. Bachorz			0,18	176,9	5,5	
		Pow. pot. Zimna Woda			0,18	166,8	5,1	
18,6	14,3	Potok Zimna Wody	2,3	30,0				
		Pon. pot. Zimna Woda			0,18	169,1	5,2	
19,5	15,2	Rozdział koryta na kanał						
		"Smolice" i rzekę			0,18	137,8	4,2	
		Powyżej jazu "Smolice"			0,18	137,8	4,2	
20,0	-	Jaz "Smolice"			0,16	137,8	4,2	
		Poniżej jazu "Smolice"			0,13	121,8	4,2	
		Powyżej rzeki Skawy						
22,7	-	Rzeka Skawa	172,6	54,0				
		Poniżej rzeki Skawy						
		Powyżej połączenia z kanałem "Smolice"			0,13	22,7	0	
23,0	18,0	Połączenia z kanałem "Smolice"			0,15	22,7	0	

Kanał "Dwory"

4,5	4,5	Początek kanału "Dwory"			0,02	37,2	9,5	bedym:
-	7,0	Śluza "Dwory"			0,02	0,0	0,0	natychniast:
-	7,5	Pow. oczyszcz. "Oświęcim"	146,2	67,0	0,02	0,0	0,0	
		Oczyszczalnia "Oświęcim"			0,03	146,2	23,9	-"
		Pon. oczyszcz. "Oświęcim"			0,03	0,0	0,0	
-	8,6	Pow. potoku Macocha	9,3	30,0				
		Potok Macocha			0,03	9,3	1,4	
		Poniżej pot. Macocha						
15,8	11,5	Pow. połączenia kanału z rzeką			0,03	0,0	0,0	

Kanał "Smolice"

19,5	15,2	Początek kanału			0,02	16,4	4,2	
-	16,6	Śluza "Smolice"			0,02	0,0	0,0	
		Powyżej rzeki Skawy			0,02	0,0	0,0	
-	17,8	Rzeka Skawa	72,6	54,0				
		Poniżej rzeki Skawy			0,2	72,6	13,8	
-	18,0	Pow. połączenia się kanału z rzeką			0,2	71,6	13,6	

poniżej $0,06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Podobne wartości podaje Chow [11]. W tabeli 1 podano średnie prędkości przepływu wody w poszczególnych odcinkach rzeki. W oparciu o analizę tychże prędkości i przedstawionych powyżej prędkości charakterystycznych dla różnych form zachowania się zawieszin stwierdzono, że odwzorowanie zmian stężeń i ładunków zawieszin w skanalizowanej rzece Górnej Wiśle jest zgodne z przyjętymi kryteriami.

Literatura

- [1] Einstein H.A.: The bed load for sediment transportation in open channel flow. US Dept. Agriculture, Soil Conservation, Ser. Techn. Bull., 1026, 1950.
- [2] Meyer-Peter E. and Müller R.: Formulae for bed load transport. Proc. 2 nd Congress IAHR, Stockholm, June, 1948.
- [3] Bagnold R.A.: The flow of cohesionless grain in fluids: Philosophical Trans. Roy. Soc. London, A, 249, No 964, 1956.
- [4] Yalin M.S.: An expression for bed load transportation. Proc. ASCE 89, HY3, 1963.
- [5] Graf W.H.: Hydraulics of sediment transport. Mc Graw-Hill Book Company, 1971.
- [6] Toffaleti F.B.: Definitive computations of sand discharge in rivers. Journal of Hydraulics Division, ASCE, Vol. 95, No HY1, Proc. Paper 6357, 1969.
- [7] Ackers P., White W.R.: Sediment transport in channels: a general function. Hydraulics Research Station, Report No INT 104, June, 1972.
- [8] Partheniades E.: Erosion and deposition of cohesive soils, Journal of Hydraulics Division, ASCE, No 91, 1965.
- [9] Bogardi J.: European concepts of sediment transportation, ASCE No 91, 1965,
- [10] Krenkel P.A.; Novotny V.: Water Quality Management, Academic Press, 1980:
- [11] Chow Ven Te: Open-channel hydraulics, Mc Graw-Hill Book Company, 1951.

A model of sediment transport in channelized river

A model of longitudinal distribution of suspended matter in a channelized river is presented. The developed calculating procedure has been applied to the assessment of changes of suspended matter concentrations and loads along Upper Vistula River after its planned channelization. The model has been verified on the base of the turbulent flow criteria.

М о д е л ь т р а н с п о р т и р о в а н и я в з в е ш е н н ы х в е щ е с т в в ш л ы з о в а н н о й р е к е .

Представлена модель изменений концентрации и суммированного содержания взвешенных веществ в шлюзованной реке. Разработанный расчетный алгоритм применен при прогнозировании изменений концентрации и суммированного содержания взвешенных веществ в реке Горная Висла после проведения ее шлюзования. Модель была верифицирована на основании критериев турбулентного потока воды.