

Marek Zawilski

ANALIZA SYMULACYJNA SPŁYWU DUŻYCH ŁADUNKÓW ZANIECZYSZCZEŃ W KANALIZACJI

Systemy kanalizacyjne w miastach są obecnie narażone na przeciążenia, zarówno hydrauliczne, jak też dużymi ładunkami zanieczyszczeń. Te ostatnie szczególnie, oprócz powodowania przekroczeń normatywnych wskaźników zanieczyszczeń w kanalizacji, mają bezpośredni wpływ na przebieg procesów technologicznych w miejskich oczyszczalniach ścieków. Cechą charakterystyczną tych przeciążeń jest to, że występują zwykle w sposób nie kontrolowany, a przynajmniej tak może to być odbierane przez eksploatatora kanalizacji. System monitoringu zanieczyszczeń odprowadzanych do miejskich sieci kanalizacyjnych jest z konieczności na tyle niedoskonały, że nie jest w stanie wykryć wszystkich zmian wskaźników zanieczyszczeń w ciągu doby, a także w dniach wolnych od pracy służb kontrolnych. Również samo określenie przeciążeń ładunkiem zanieczyszczeń, nawet w przypadku celowej obserwacji danego źródła powstawania, jest trudne.

Autorowi udało się to ściśle tylko w kilku przypadkach. Reszta danych pochodzi z analizy bardzo dużej liczby wyników standardowo wykonywanych kontroli jakości ścieków przemysłowych. Istnieje ponadto jeszcze jedna grupa przyczyn omawianych przeciążeń, a mianowicie awarie technologiczne w zakładach przemysłowych lub gospodarki komunalnej. O tym, że są one znaczące dla podejmowanych rozważań świadczy przykład przytoczony pod koniec niniejszego artykułu, który stanowi kontynuację wcześniejszych prac [2, 3].

Algorytm obliczeń symulacyjnych

Podstawowym związkiem przyjętym do opisanie czasowo-przestrzennego rozkładu stężenia zanieczyszczeń w kanale jest równanie różniczkowe:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -v \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (1)$$

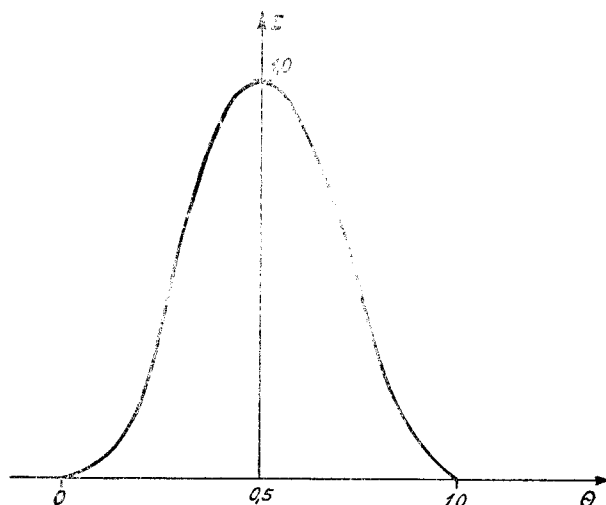
w którym:

- c — stężenie zanieczyszczeń [g/m^3],
- t — czas [min lub s],
- x — droga wzdłuż kanału [m],
- v — średnia prędkość przepływu [m/s],
- D_L — współczynnik dyspersji wzdłużnej [m^2/s].

Równanie to oraz zasady jego numerycznego rozwiązywania omówiono szczegółowo w pracy [2]. Opisuje ono ruch masy zanieczyszczeń

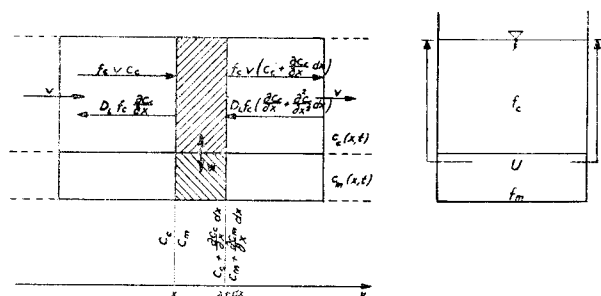
w kanale, jako reaktorze „półnieskończonym”, tj. przy warunku brzegowym „swobodnym” od strony końca kanału.

Dla potrzeb ostatecznych obliczeń zmodyfikowano kształt polutogramu wyjściowego (źródłowego) — funkcję „impulsu jednostkowego”. Bezwymiarową funkcję pierwotną przedstawia rysunek 1. Przez pomnożenie tej funkcji przez wartości czasu trwania spływu oraz maksymalne stężenia, otrzymuje się ostateczną funkcję wyjściową nagłego spływu zanieczyszczeń do kanału.



Rys. 1. Kształt polutogramu wyjściowego (w układzie współrzędnych bezwymiarowych)

Szczegółowa analiza badań mieszania wzdłużnego w kanałach doprowadziła do podania propozycji uściślenia algorytmu, co jednak będzie się wiązało z wydłużeniem czasu obliczeń. Chodzi tu o model przepływu z przestrzenią martwą, wymieniającą masę z czynną przestrzenią przepływu (rys. 2).



Rys. 2. Schemat obliczeniowy do modelowania przepływu zanieczyszczeń w kanałach przy występowaniu niewielkich stref martwych

Równania bilansowe, opisujące całe zjawisko mają następującą postać:

$$\left\{ \begin{aligned} f_c \frac{\partial c_c}{\partial t} dx &= f_c v_c c_c - f_c v \left(c_c + \frac{\partial c_c}{\partial x} dx \right) + \\ &+ f_c D_L \left(\frac{\partial c_c}{\partial x} + \frac{\partial^2 c_c}{\partial x^2} dx \right) - f_c D_L \frac{\partial c_c}{\partial x} - wU dx (c_c - c_m) \end{aligned} \right. \quad (2a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} f_m \frac{\partial c_m}{\partial t} &= -wU dx (c_m - c_c) \end{aligned} \right. \quad (2b)$$

Po wykonaniu przekształceń otrzymuje się ostatecznie następujący układ równań:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial c_c}{\partial t} &= -v \frac{\partial c_c}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 c_c}{\partial x^2} - N \frac{v}{R_h} (c_c - c_m) \end{aligned} \right. \quad (3a)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial c_m}{\partial t} &= N \frac{v}{R_h} \frac{\varphi}{1-\varphi} (c_c - c_m) \end{aligned} \right. \quad (3b)$$

w którym:

$N = w/v$ — stosunek prędkości przechodzenia masy ze strefy martwej do czynnej i prędkości przepływu w strefie czynnej,
 $\varphi = f_c / (f_c + f_m)$ — udział strefy czynnej w objętości sumarycznej obu stref,
 R_h — promień hydrauliczny [m].

Przy wykorzystaniu podobnego modelu, Villermoux i Van Swaaij badali przepływ cieczy przez kolumny wypełnione pierścieniami Raschiga [5]. Wielkość liczby Pecleta ($Pe = vL/D_L$), zajętość przestrzeni martwych oraz intensywność wymiany masy z przestrzenią martwą zależały od natężenia przepływu cieczy przez kolumnę. Przy odpowiednio dużych natężeniach przepływu wartości φ zbliżały się do 0,9÷0,95, a współczynnik wymiany masy (odpowiednik w) malał i przyjmował wartości poniżej jedności.

Ponadto, przyjęcie modelu ze strefami martwymi pozwoliło na znacznie lepsze opisanie krzywej przepływu. Przykładowo, dla pierwszej krzywej aproksymującej, możliwe jest przyjęcie $Pe = 13,6$ dla modelu mieszania wzdłużnego przy $\varphi = 1$, bądź (przy znacznie lepszej zgodności z doświadczeniem) $Pe = 72$, $w = 2,12$ oraz $\varphi = 0,65$. Wartość D_L jest więc sześciokrotnie niższa. Podobne zjawisko występuje prawdopodobnie w kanałach.

Rozwiązanie układu równań (3a) i (3b) wymagać będzie uzupełnienia przedstawionego już programu do opracowywania wyników oraz programu do modelowania spływu zanieczyszczeń w kanalizacji. Trudności należy upatrywać w bardzo gwałtownych zmianach stężeń w początkowej fazie spływu (duże wartości prawej strony równania (3b) przy φ bliskim 1 i dużej różnicy $c_c - c_m$). Poza tym funkcja opisująca krzywą przepływu nie może być opisana prostymi zależnościami, a rozwiązanie układu równań (3a) i (3b) nie istnieje dla funkcji wymierzonych [4].

Uściślenie parametrów mieszania wzdłużnego

Badania mieszania wzdłużnego w kanałach prowadzono przy użyciu Rodaminy B, zamiast wodnego roztworu chlorku sodowego. Chodziło przede wszystkim o zwiększenie skuteczności pobierania prób, gdyż badania dotyczyły kanałów otwartych. Po wprowadzeniu pewnej masy barwnika w górnym punkcie odcinka kanału, pobierano w dolnym punkcie próby z dużą częstotliwością (nawet co 15 s) i oznaczano w nich barwę metodą kolorymetryczną ($\lambda = 556$ nm). Barwnik był wykrywalny jeszcze przy stężeniach $10^{-6} \div 10^{-7}$ w stosunku do stężenia roztworu wyjściowego. Do otrzymanego w każdej serii zbioru punktów pomiarowych dopasowywano krzywą przepływu, a celem tej operacji było wyznaczenie współczynnika dyspersji wzdłużnej. Dokładniej, określeniu podlegała nie wartość D_L , lecz wartość stałej k we wzorze:

$$D_L = k \cdot h \cdot \sqrt{g \cdot i} \cdot R_h \quad (4)$$

w którym:

h — napelnienie w kanale [m],
 g — przyspieszenie ziemskie [m/s²],
 i — spadek podłużny kanału,
 R_h — promień hydrauliczny [m].

W trakcie badań mierzono spadek kanału i jego napelnienie (w warunkach naturalnych nie było innej metody pomiaru natężenia przepływu). Częściowa weryfikacja tej wielkości mogła też być przeprowadzona dzięki pomiarowi średniej prędkości z krzywej przepływu. Dla dopasowania krzywej teoretycznej [2] do punktów pomiarowych zastosowano metodę minimalizacji średniego odchylenia standardowego względnego:

$$OSW = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{it})^2 / (n-1)} / y_{\max} \quad (5)$$

gdzie:

y_i — wartości stężeń zmierzone,
 y_{it} — wartości stężeń teoretyczne,
 n — liczba pomiarów w danej serii.

Zmiennymi optymalizowanymi były:

— stała doświadczalna (k),
 — średni czas przepływu (środek ciężkości krzywej) (t_m),
 — stosunek masy znacznika do natężenia przepływu (m/Q).

Ten ostatni parametr formalnie nie powinien być zmienną, jako że zarówno masa znacznika, jak i natężenie przepływu podlegały pomiarom. Jednakże ze względu na błędy tych pomiarów (ok. 10%), jak też pewne wahania natężenia przepływu nawet podczas pomiarów (0,5÷1 h), niedopasowanie wielkości m/Q dawałoby błędne rezultaty określenia parametru k .

Opisana metoda aproksymacji została zaprogramowana jako dwustopniowa metoda optymalizacyjna. Algorytm startuje wpięrow z zadanych wartości k , t_m oraz m/Q , zmieniając je następnie w pewnym zakresie metodą losową (ok. 300 razy) i akceptując te ich wartości, które powodują zmniejszenie OSW. Drugi etap obliczeń polega na poprawieniu OSW metodą minimalizacji na trzech kierunkach aż do uzyskania wartości k , t_m , m/Q z założoną dokładnością. Program zapisano w BASIC-u na ZX Spectrum, a używany jest jako skompilowany. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
WYNIKI BADAŃ MIESZANIA WZDŁUŻNEGO W KANAŁACH

Nr serii	Q [m ³ /s]	h [m]	k	t_m [min]	m/Q	Znacznik
1	0,41	0,50	0,82	24,9	14291	solanka
2	0,11	0,32	0,65	66,3	23612	"
3	1,70	0,82	2,47	17,2	1814	"
4	0,90	0,34	10,29	18,6	0,011	barwnik
5	0,009	0,06	1,61	31,4	0,16	"
6	0,021	0,08	1,51	62,3	0,0076	"
7	0,223	0,29	0,55	11,0	0,0007	"

Dla solanki wartości m były przyjmowane w gramach, dla barwnika — w jednostkach umownych (wartości 1 przyjęto dla stężonego roztworu z serii nr 4).

Wartości k są niższe od danych literaturowych. Przyjmując model, w którym występuje idealne mieszanie wzdlużne, można założyć $k=0,7$. Przy silnych spływach zanieczyszczeń, gromadzą się one w pobliżu dna kanału (strefa martwa) i są wypłukiwane z biegiem czasu. Toteż w takich przypadkach wartość k jest sztucznie zawyżana i dochodzi do ok. 10 (seria nr 4). Ma to także miejsce przy niezbyt dużych napełnieniach i prędkościach przepływu. Przyjęcie $k=10$ może być jednak uzasadnione tym, że w obliczeniach symulacyjnych chodzi przede wszystkim o określenie maksymalnych wartości stężeń dla fal przepływu zanieczyszczeń, a mniej istotne są wartości stężeń dla końca fali. Usunięcie tych niedogodności mogłoby przynieść przyjęcie bardziej złożonego, opisanego wyżej modelu ze strefą martwą.

Analizy symulacyjne dla kanalizacji m. Łodzi

Przed przystąpieniem do właściwych obliczeń, zebrano dane na temat spływu nagłych fal zanieczyszczeń do kanalizacji. Szczególnie drastyczne przypadki przedstawia tabela 2.

Można przypuszczać, że nie są to przypadki wyczerpujące wszystkie możliwości przeciążenia kanalizacji. Przed obliczeniami utworzono też zbiór danych o geometrii sieci i średniodobowych natężeniach przepływu [6]. Opracowane programy obliczeniowe pozwalają na przeprowadzenie dwóch zasadniczych typów obliczeń:

— prognozowanie nagłych, pojedynczych i licznych (równoczesnych lub nierównoczesnych), spływów zanieczyszczeń do kanalizacji miejskiej,

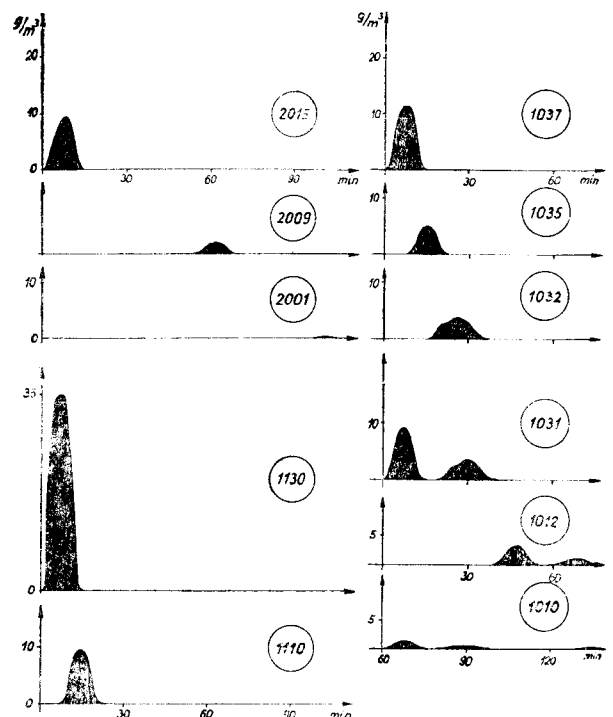
Tabela 2
MAKSYMALNE STĘŻENIA NIEKTÓRYCH ZANIECZYSZCZEŃ
ODPROWADZANYCH ZE ŚCIEKAMI PRZEMYSŁOWYMI
Z TERENU ŁODZI [g/m³]

Zakład przemysłowy	Q _{śr} [m ³ /d]	ChZT	Chlor-ki	Siar-czany	Cyjan-ki	Suma metali ciężkich
mechaniczny	580	—	—	—	3,0	11,6
mechaniczny	750	3000	—	900	—	35,2
mięsny	250	3000	—	—	—	—
włókienniczy	2600	15400	20000	—	—	—
mechaniczny	270	3000	—	—	26,0	95
farmaceutyczny	1300	20000	20000	—	—	—
mechaniczny	160	—	—	—	—	30
Dopuszczalne wartości stężeń zanieczyszczeń w kanalizacji	1000	400	300	1,0	3,0	—

— prognozowanie zmian zanieczyszczeń w kanalizacji, wywołanych stałą zmianą ilości lub składu ścieków, odprowadzanych z danego źródła.

Drugi typ obliczeń jest bardzo prosty i nie będzie tu szczegółowo omawiany. Umożliwia on analizę „wąskich gardeł” systemu kanalizacyjnego zarówno ze względów hydraulicznych (przepelnienia) jak i technologicznych (stałe przekroczenia parametrów dopuszczalnych dla składu ścieków). Jest on przydatny przy wydawaniu decyzji na odprowadzanie zwiększonej ilości ścieków do kanalizacji.

Pierwszy typ obliczeń, dokładniej prezentowany w niniejszym opracowaniu, wymagał zastosowania dużych mocy obliczeniowych (mini-komputer MERA-400). Program obliczeniowy jest dostosowany właściwie do przyjęcia do-



Rys. 3. Przykładowe wyniki obliczeń symulacyjnych przepływu zanieczyszczeń w kanalizacji ŁAM. Efekt wystąpienia kilku nagłych jednoczesnych spływów zanieczyszczeń. Punkt nr 1010 znajduje się w pobliżu wlotu kolektora do GOS-ŁAM.

wolnej liczby źródeł zanieczyszczeń i dowolnego kształtu polutogramu wyjściowego. W przeprowadzonych obliczeniach przyjmowano opisany wyżej kształt krzywej polutogramu (rys. 1), możliwa jest jednak jej modyfikacja lub też symulacja sekwencyjnie powtarzających się zrzutów (np. co 15 min do 1 godz.). Wyniki przykładowych obliczeń przedstawia rysunek 3. Dotyczą one zrzutu metali ciężkich.

Przykład awarii technologicznej w zakładzie przemysłowym

W ubiegłym roku w jednym z zakładów włókienniczych w Łodzi nastąpiła awaria maszyny barwarskiej. Wcześniej w hali produkcyjnej pękł balon zawierający 100 dm³ kwasu octowego. Ponieważ kwas nie został usunięty na czas, po opróżnieniu maszyny z kąpieli barwarskiej w kanalizacji zakładowej nastąpiła reakcja chemiczna, w wyniku której wystąpiło silne wydzielanie się siarkowodoru (kapiel barwarska zawierała siarczek sodu). Na domiar złego kanał był niedrożny i siarkowodor uwalniał się do wnętrza hali. W wypadku śmierć poniosły 4 osoby z załogi zakładu, zaś ogółem 59 uległo zatruciu. Kwas oraz reszta barwnika trafiły do kanalizacji miejskiej, gdzie na szczęście nie doszło już do dalszych wypadków. Przypadek ten uwiadamia, że nieoczekiwane spływy do kanalizacji dużych ładunków zanieczyszczeń mogą się istotnie zdarzać, mimo potencjalnego zabezpieczenia przed tego typu wypadkami.

Wnioski

1. W rezultacie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych stwierdzono, że stężenia niektórych zanieczyszczeń (metale ciężkie, cyjanki, żelazo, detergenty) po dopłynięciu ścieków do oczyszczalni, pomimo rozcieńczenia i mieszania wzdłużnego, mogą osiągać wartości, zagrażają-

ce procesowi oczyszczania biologicznego [5]. Pięciokrotne zmniejszenie wartości k (z 10 do 2) powoduje około dwukrotny wzrost maksymalnego stężenia zanieczyszczeń.

2. Wzdłuż drogi przepływu ścieków w kanałach, stężenia zanieczyszczeń zmniejszają się bardziej wskutek rozcieńczenia niż mieszania wzdłużnego (chyba, że brak jest dopływów bocznych). Przekroczenia wskaźników zanieczyszczeń w kanałach (nawet przy uwzględnianiu rozcieńczenia ściekami), występują zwykle na długości około 10 km (kanalizacja m. Łodzi).

3. Jednoczesne występowanie nagłych zrzutów w tak dużym systemie kanalizacji nie pogarsza sytuacji, ponieważ istnieje małe prawdopodobieństwo ich wzajemnego nałożenia się. O ile zrzuty te występowałyby często w przypadku mniejszych systemów kanalizacyjnych, ich nakładanie się potęgowałoby niekorzystne efekty dla pracy oczyszczalni.

LITERATURA

1. Wytyczne bilansowania zanieczyszczeń, odprowadzanych do kanalizacji i GOS-LAM. Modelowanie składu ścieków w kanalizacji m. Łodzi. Sprawozdania za lata 1986 i 1987 (maszynopis).
2. M. ZAWILSKI: Symulacja spływu zanieczyszczeń w kanalizacji. Ochrona Środowiska nr 1—2/27—28, Wrocław 1986, s. 67—70.
3. R. KRZEMINSKI, M. ZAWILSKI: Współpraca sieci kanalizacyjnej z oczyszczalnią ścieków. Ochrona Środowiska nr 1—2/27—28, Wrocław 1986, s. 87—90.
4. J. VILLERMAUX, W.P.N. VAN SWAAN: Modèle representatif de la distribution des temps... Chem. Sci., 1969, Vol. 24, s. 1097—1111.
5. K. JĘDRZEJEWSKA, M. ZAWILSKI: Krótkotrwałe zakłócenia procesu oczyszczania ścieków osadem czynnym. Mat. sem. „Eksploatacja oczyszczalni ścieków”, PZITS, Sielcowa 1987, s. 51—63.
6. B. KOZŁOWSKA, T. PARADA, G. SAKSON, M. ZAWILSKI: Atlas spływu zanieczyszczeń dla systemu kanalizacyjnego Łódzkiej Aglomeracji Miejskiej. Mat. II Zjazdu Kanalizatorów Polskich POLKAN'85. Systemy kanalizacyjne, s. 112—119.

SIMULATION OF THE DISCHARGE OF HIGH POLLUTION LOADS TO THE SEWER

The paper gives an algorithm for the simulation of high-pollution-load discharges in the sewer network. Discharges of that kind come, e.g., from failure in an industrial plant (heavy metals) and have an undesirable influence on the efficiency of the sewage treatment plant. In the calculating procedure a dis-

inction is made between dead zones and longitudinal mixing in the sewer. The phenomenon has been investigated in an open channel, using a dye tracer (Rhodamine B). The computer programmes make it possible to forecast both the variations of pollutants in the sewer and emergency discharge of pollutants into the municipal sewer. Calculations were carried out for an actual sewer system operated in a large industrialized municipal agglomeration.