

Janusz Dolecki
Aleksander Usakiewicz

MODEL SZACOWANIA WSKAŹNIKÓW ZANIECZYSZCZEŃ W SPŁYWACH Z KANALIZACJI DESZCZOWEJ

Ustalenie składu ścieków jest niezbędnym elementem służącym do opracowania koncepcji oraz przyjęcia rozwiązań technicznych systemów kanalizacyjnych. W praktyce inżynierskiej dla jakościowej charakterystyki ścieków stosuje się badania laboratoryjne, określające stężenia podstawowych zanieczyszczeń lub też wyznacza się je w sposób pośredni, na podstawie wartości jednostkowych ładunków zanieczyszczeń.

Taki tok postępowania, powszechnie przyjmowany w przypadku ścieków bytowo-gospodarczych lub przemysłowych, nie może być jednak stosowany przy ustalaniu składu ścieków deszczowych. Wynika to przede wszystkim z tego, że na jakość ścieków deszczowych odprowadzanych systemem kanalizacji z danej zlewni, wpływają czynniki charakteryzujące zlewnię, przy czym nie można uprościć tego zagadnienia tylko do analizy powierzchni zlewni i wartości współczynnika spływu. Sposób rozwiązania układu kanalizacji deszczowej, zakres wykorzystania retencyjności terenu i sieci przewodów oraz ukształtowanie zlewni decydować będą, przy znanej średniorocznej wysokości opadu oraz przyjętej częstotliwości przekroczenia prognozowych deszczów, o ilości i składzie odprowadzanych ścieków deszczowych.

Przedstawiony poniżej model szacowania wielkości wskaźników zanieczyszczeń ścieków deszczowych zawiera formuły obliczeniowe, za pomocą których można wyznaczyć następujące wartości:

- masę nagromadzonych zanieczyszczeń na powierzchni zlewni,
- masę i stopień spłukania zanieczyszczeń przez deszcz miarodajny dla rozpatrywanego obszaru,
- stężenie zawiesiny ogólnej w spływie deszczowym pochodzącym od deszczu miarodajnego,
- stężenie BZT₅ dla tych samych warunków.

Wyprowadzenie zależności określających liczbowo poszczególne wskaźniki poprzedzone zostało analizą zmierzającą do przyjęcia takich czynników mających wpływ na szukane wartości, które są możliwe do liczbowego ustalenia podczas projektowania układów kanalizacyjnych. Do parametrów wyjściowych, na których oparto proponowany model należą:

- powierzchnia zlewni (F) w ha,
- współczynnik spływu (Ψ),
- średni spadek kanałów (i) w ‰,
- długość ciągu kanałów (L) w m,
- natężenie deszczu (q) w dm³/s·ha,
- częstotliwość występowania deszczu o określonym natężeniu i czasie trwania (c) w latach,
- średnioroczna wysokość opadu nad rozpatrywanym obszarem (P) w mm/rok.

Masa nagromadzonych zanieczyszczeń na powierzchni zlewni projektowanego układu kanalizacji deszczowej jest wynikiem zaśmiecania przez ludzi, zwierzęta i pojazdy, nanoszenia cząstek gleby i roślin, osiadania pyłu i aerozoli oraz powstawania produktów ścierania nawierzchni utwardzonych jezdni, chodników i placów. W warunkach miejskich zanieczyszczenia te usuwane są przez służby oczyszczania. Można założyć, że przy prawidłowej organizacji, występuje regularność w częstotliwości pracy, zależna od rodzaju i rangi powierzchni terenu oraz, że masa nagromadzonych zanieczyszczeń przed kolejnym sprzątaniem (zamiataniem, oczyszczaniem, zmywaniem) osiąga pewną wartość dopuszczalną w odniesieniu do jednostki powierzchni (m_0). Przy takich założeniach w okresie letnim, opad deszczowy dostaje się na powierzchnię, która może być pokryta masą zanieczyszczeń w ilości co najwyżej równej m_0 . Wartość ta jest zależna od rodzaju powierzchni i stopnia intensywności jej użytkowania.

Przyjęto, że jednostkową masę nagromadzonych zanieczyszczeń można uzależnić od współczynnika spływu:

$$m_0 = f(\Psi) \quad [\text{g/m}^2] \quad (1)$$

Wykorzystując dane z norm sanitarnych stosowanych przy oczyszczaniu miast [1], przyjęto następującą formułę na obliczanie masy nagromadzonych zanieczyszczeń:

$$m_0 = \frac{B}{\Psi^b} \quad (2)$$

gdzie:

B — współczynnik równoznaczny z jednostkową masą nagromadzonych zanieczyszczeń na powierzchni 1 m² przy całkowitej jej szczelności ($\Psi=1,0$),
b — wykładnik określający proporcjonalność nagromadzenia zanieczyszczeń w stosunku do stopnia szczelności powierzchni.

Dla przeciętnych warunków miejskich wyznaczono następujące wartości liczbowe współczynników:

$$B = 15 \text{ g/m}^2 \\ b = 5/4$$

Tak więc, wzór (2) przybierze postać:

$$m_o = \frac{15}{\psi^{5/4}} \quad [\text{g/m}^2] \quad (3)$$

Masę splukiwanych zanieczyszczeń przez deszcz można wyznaczyć przyjmując następujące założenia:

- splukiwaniu podlegają zarówno zanieczyszczenia nagromadzone na powierzchni szczelnej jak i cząstki gleby w wyniku erodującego oddziaływania deszczów nawalnych,
- zanieczyszczenia są równomiernie rozłożone na powierzchni,
- powierzchnia jest jednostajnie nachylona w kierunku wpustu deszczowego,
- warstwa opadu spływającego po powierzchni jest uśredniona w czasie trwania spływu.

Wykorzystując analogię splukiwania zanieczyszczeń do ruchu rumowiska rzeczno [2, 3], przyjęto prędkość ruchu spływu powierzchniowego jako:

$$v = \frac{1}{n} \cdot h^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad [\text{m/s}] \quad (4)$$

gdzie:

- n — współczynnik szorstkości,
- h — wysokość warstwy wody spływającej po powierzchni [m],
- i — spadek powierzchni.

Natomiast wpływ nagromadzonych zanieczyszczeń na zwiększenie oporów tarcia z wartości n do n_z został przeanalizowany przy wykorzystaniu następującej proporcji:

$$\frac{n_z}{n} = \left(\frac{\rho_w}{\rho_z} \right)^{2/3} \quad (5)$$

gdzie:

- ρ_w — gęstość wody,
- ρ_z — gęstość zanieczyszczeń.

Wykorzystując pojęcie siły poruszającej, w pracy [4] przeprowadzono szczegółową analizę zmierzającą do określenia, jaka jej część jest wykorzystywana do transportu zanieczyszczeń i otrzymano następujące wzory na jednostkową masę splukiwanych zanieczyszczeń:

$$m_s = 1,8 \left(\frac{\rho_w}{\rho_z} \right)^{4/3} \cdot \frac{i^{5/32} \cdot t_d^{3/8} \cdot q^{1/16}}{\psi^{7/8}} \quad [\text{g/m}^2] \quad (6)$$

po przyjęciu:

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3 \\ \rho_z = 1800 \text{ kg/m}^3$$

$$m_s = 0,8265 \frac{i^{5/32} \cdot t_d^{3/8} \cdot q^{1/16}}{\psi^{7/8}} \quad [\text{g/m}^2] \quad (7)$$

Przy czym we wzorach (6) i (7) poszczególne wielkości należy przyjmować w następujących jednostkach:

- i — średni spadek w ‰,
- t_d — czas trwania deszczu w min.,
- q — natężenie deszczu w $\text{dm}^3/\text{s} \cdot \text{ha}$,
- ψ — współczynnik spływu.

Stopień splukania zanieczyszczeń w omawianym modelu jest wyrażony stosunkiem m_s/m_o . Jednakże przy wystąpieniu deszczu o znacznym natężeniu i małej masie nagromadzonych zanieczyszczeń, wartość ta może być większa od jedności. Wtedy interpretacja wyników winna być uzależniona od oceny charakteru zlewni. W przypadku występowania powierzchni nieutwardzonych, zieleni miejskiej lub słabo porośniętej gleby można uznać, że masa splukana jest sumą nagromadzonych zanieczyszczeń na powierzchniach szczelnych oraz cząstek erodującego gruntu:

$$m_s = m_o + m_e \quad (8)$$

Stężenia wybranych wskaźników zanieczyszczeń są proporcjonalne do masy splukanych zanieczyszczeń i objętości spływu, jaki wystąpi ze zlewni kanalizacji deszczowej. Tak więc:

$$S = \frac{L}{W} \quad [\text{g/m}^3] \quad (9)$$

gdzie:

- L — ładunek zanieczyszczeń wyrażony w gramach wybranego wskaźnika,
- W — objętość spływu w m^3 .

Ładunek zawiesiny ogólnej wyraża zależność:

$$L_{ZAW} = 10^4 \cdot a_1 \cdot m_s \cdot F \cdot \psi \quad [\text{g}] \quad (10)$$

Analogicznie ładunek BZT₅ wyniesie:

$$L_{BZT5} = 10^4 \cdot a_2 \cdot m_s \cdot F \cdot \psi \quad [\text{g}] \quad (11)$$

Natomiast objętość spływu wyznacza się ze wzoru:

$$W = 0,06 \cdot q \cdot t \cdot F \cdot \psi \quad [\text{m}^3] \quad (12)$$

Współczynniki a_1 i a_2 mogą być liczbowo wyrażone dla przeciętnych warunków jako równe [4]:

$$a_1 = 0,08 \\ a_2 = 0,05$$

Wtedy stężenie zawiesiny wyniesie:

$$S_{ZAW} = \frac{i^{5/32}}{9 \cdot t^{5/8} \cdot q^{15/16} \cdot \psi^{7/8}} \quad [\text{g/m}^3] \quad (13)$$

natomiast stężenie BZT₅ będzie równe:

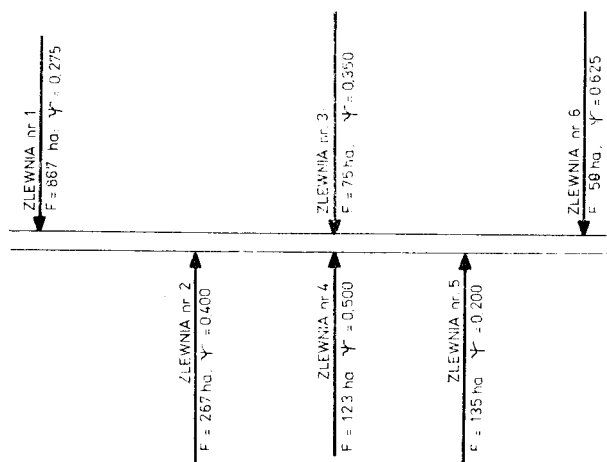
$$S_{BZT5} = \frac{7 \cdot i^{5/32}}{10^3 \cdot t^{5/8} \cdot q^{15/16} \cdot \psi^{7/8}} \quad [\text{g/m}^3] \quad (14)$$

Wyliczone w ten sposób wskaźniki zanieczyszczeń są wartościami uśrednionymi w czasie trwania spływu wód od wybranego deszczu dla całego obszaru. W zależności od potrzeb można więc określać szacunkowe wartości wskaźników zanieczyszczeń, przyjmując czas trwania deszczu lub jego natężenie (uwzględniając funkcyjną zależność obu wartości). Pozostaje jednak do rozważenia problem, jaki deszcz (o jakich parametrach) okaże się miarodajny dla rozpatrywanego obszaru miasta.

Przepływy obliczeniowe miarodajne do wymiarowania poprzecznych przekrojów kanałów są wartościami maksymalnymi i można stwierdzić, że w istocie każdy odcinek kanału między węzłami obliczeniowymi jest liczony na przepływ pochodzący od deszczu o różnym czasie trwania, a więc miarodajny jedynie dla tego odcinka. Dla pojedynczego układu kanałów deszczowych, gdy występuje jeden wylot do odbiornika, za miarodajny deszcz do określania stężeń i ładunków zanieczyszczeń uznać trzeba ten, który został przyjęty jako obliczeniowy do wymiarowania przekroju poprzecznego na ostatnim odcinku całego układu, między wylotem i ostatnim węzłem. Czas trwania tego deszczu jest dobrany tak, że przynajmniej w jednym momencie nastąpi skumulowanie odpływu z całej zlewni, dając maksymalny przepływ. Deszcz ten obejmuje całą powierzchnię zlewni i spowoduje spłukanie określonej części nagromadzonych zanieczyszczeń.

Trzeba przy tym pamiętać, że analizowanie stężeń i ładunków zanieczyszczeń odnosi się do przypadku, który może się zdarzyć raz na (c) lat, wobec tego wartości natężenia zanieczyszczeń będą maksymalne dla całego okresu czasu. Nie ma podstaw do stwierdzenia, że również stężenia wybranych wskaźników zanieczyszczeń w omawianych warunkach będą maksymalne, jednakże przy każdym innym deszczu o mniejszej intensywności lub krótszym czasie trwania, wystąpią warunki powodujące bądź mniejszą wartość współczynnika spłukania zanieczyszczeń, bądź nie wystąpi kumulacja spływu z całej powierzchni zlewni.

Dla systemu kanalizacji deszczowej, obejmującego obszar miasta i składającego się z co najmniej dwu układów o oddzielnych wylotach, wybór deszczu miarodajnego do bilansowania ładunków zanieczyszczeń i określania stężeń w ściekach deszczowych odprowadzanych do odbiornika, winien polegać na wyborze układu kanalizacji o najdłuższym czasie spływu, pochodzącego od deszczu o parametrach (t, q, c), przy których dokonano obliczenia przepływu miarodajnego do zwymiarowania ostatniego odcinka przed wylotem całego układu. Deszcz ten, spowoduje spływy z pozostałych układów kanalizacyjnych o natężeniu niższym niż miarodajne, jednakże suma odpływu do odbiornika z całego systemu będzie wartością maksymalną w przyjętym okresie (c).



Nr zlewni	Wartości parametrów charakteryzujących zlewnie w przyjętych wariantach					
	Długość maksymalnego ciągu [m]			Średni spadek kanałów [‰]		
	war I	war II	war III	war I	war II	war III
1	4250	5300	6375	2,50	2,00	1,67
2	2300	2875	3450	4,50	3,60	3,00
3	1200	1500	1800	5,50	4,40	3,67
4	1500	1875	2250	4,00	3,20	2,67
5	1600	2000	2400	8,00	6,40	5,33
6	1000	1250	1500	7,00	5,60	4,57

Rys. 1. Schemat i parametry układu kanalizacyjnego.

Podobnie jak przy układzie pojedynczym, wartości uzyskanych stężeń zanieczyszczeń odprowadzanych do odbiornika będą w sumie maksymalne, jakie mogą się zdarzyć w założonych warunkach obliczeniowych.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat i rzeczywiste dane dotyczące układów kanalizacji deszczowej z wariantowym przyjęciem długości i spadków kanałów w celu zobrazowania wpływu tych wielkości na obliczone ładunki i stężenia zanieczyszczeń. Tabele 1÷4 zawierają wyniki obliczeń, które przeprowadzono porównawczo według prezentowanego modelu oraz formuł stosowanych w ZSRR (model Szigorina). W kolumnach „średnie stężenie zanieczyszczeń” podano wartości wynikające z podzielenia masy ładunku przez odpływ sumaryczny. Aby otrzymać wartości stężenia zawiesiny lub BZT₅, należy obliczoną wartość pomnożyć przez współczynnik a₁ lub a₂.

OBLICZENIA ŁADUNKÓW I STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚCIEKACH DESZCZOWYCH DLA WARIANTU I
(P=600 mm, c=1 rok, t=440,8 min, q=8,14 dm³/s·ha)

Numer zlewni	Jedn. ilość zgromadz. zaniecz.	Max. natęż. odpływu	Odpływ sumaryczny	Współ. spłuk.	Model Usakiewicz		Współ. spłuk.	Model Szigorina	
					Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.		Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.
	g/m ²	m ³ /s	m ³		kg	kg/m ³		kg	kg/m ³
1	75,32	1,942	51357,7	0,438	78680,6	1,532	0,499	89538,4	1,743
2	47,15	0,870	23005,2	0,553	27834,7	1,210	0,499	25108,4	1,091
3	55,72	0,214	5654,4	0,542	7934,2	1,403	0,499	7292,4	1,290
4	35,68	0,501	13247,4	0,590	12945,0	0,977	0,299	10939,2	0,826
5	112,15	0,220	5815,9	0,466	14119,7	2,428	0,499	15097,3	2,596
6	26,99	0,255	6731,4	0,700	5905,5	0,877	0,499	4205,6	0,625

Tabela 1

Tabela 3

OBLICZENIA ŁADUNKÓW I STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚCIEKACH DESZCZOWYCH DLA WARIANTU I
($P=600$ mm, $c=2$ lata, $t=623,3$ min, $q=8,14$ dm³/s·ha)

Numer zlewni	Jedn. ilość odprowadz. zaniecz.	Max. natęż. odpływu	Odpływ sumaryczny	Współ. spluk.	Model Usakiewicza		Współ. spluk.	Model Szigorina	
					Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.		Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.
	g/m ²	m ³ /s	m ³		kg	kg/m ³		kg	kg/m ³
1	75,32	1,942	72623,2	0,499	89599,4	1,234	0,616	110700,7	1,524
2	47,15	0,870	32533,1	0,629	31697,5	0,974	0,616	31042,8	0,954
3	55,72	0,214	7996,2	0,618	9035,3	1,130	0,616	9015,9	1,128
4	35,68	0,501	18733,9	0,672	14741,4	0,787	0,616	13524,7	0,722
5	112,15	0,220	8224,6	0,531	16097,1	1,955	0,616	11565,5	2,269
6	26,99	0,255	9519,3	0,797	6725,0	0,706	0,616	5199,5	0,546

Tabela 3

OBLICZENIA ŁADUNKÓW I STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚCIEKACH DESZCZOWYCH DLA WARIANTU III
($P=300$ mm, $c=1$ rok, $t=1591,9$ min, $q=3,46$ dm³/s·ha)

Numer zlewni	Jedn. ilość zgromadz. zaniecz.	Max. natęż. odpływu	Odpływ sumaryczny	Współ. spluk.	Model Usakiewicza		Współ. spluk.	Model Szigorina	
					Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.		Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.
	g/m ²	m ³ /s	m ³		kg	kg/m ³		kg	kg/m ³
1	75,32	0,825	78795,6	0,631	113340,8	1,438	0,554	99472,9	1,262
2	47,15	0,370	35295,7	0,796	40083,9	1,136	0,554	27894,3	0,790
3	55,72	0,091	8675,2	0,781	11427,5	1,317	0,554	8101,5	0,934
4	35,68	0,213	20324,7	0,850	18645,3	0,917	0,554	12152,9	0,598
5	112,15	0,093	8923,1	0,671	20331,3	2,279	0,554	16772,4	1,880
6	26,99	0,108	10.327,6	1,008	8595,2	0,824	0,554	4672,2	0,452

Tabela 4.

OBLICZENIA ŁADUNKÓW I STĘŻEŃ ZANIECZYSZCZEŃ W ŚCIEKACH DESZCZOWYCH DLA WARIANTU III
($P=600$ mm, $c=2$ lata, $t=1450,3$ min, $q=4,64$ dm³/s·ha)

Numer zlewni	Jedn. ilość zgromadz. zaniecz.	Max. natęż. odpływu	Odpływ sumaryczny	Współ. spluk.	Model Usakiewicza		Współ. spluk.	Model Szigorina	
					Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.		Odprowadz. ładunek zanieczyszcz.	Średnie stężenie zanieczyszcz.
	g/m ²	m ³ /s	m ³		kg	kg/m ³		kg	kg/m ³
1	75,32	1,106	96239,0	0,621	111473,9	1,158	0,673	120819,3	1,255
2	47,15	0,495	43109,3	0,783	39423,7	0,915	0,673	33880,3	0,736
3	55,72	0,122	10595,7	0,768	11239,2	1,061	0,673	9840,0	0,929
4	35,68	0,285	26824,2	0,836	18336,2	0,739	0,673	14760,9	0,595
5	112,15	0,125	10898,4	0,668	19996,4	1,835	0,673	20371,7	1,869
6	26,99	0,145	12613,9	0,992	8365,2	0,663	0,673	5674,8	0,450

LITERATURA

1. J. Ł. SZEWCZENKO, T. D. DMITRENKO: Sprawozdanie po sanitarniej oczystkcie gorodow i posiolkow. Budiwielnik, Kijew 1978.
2. I. R. W. ALLEN: Fizyczne procesy sedymantacji. PWN, Warszawa 1977.
3. I. W. ELIZAROW: Sopstwalijenie metodow raschota raschoda nanosow s izmierenijami w naturie. Metody izuczenija i ispolzowanija wodnych resursov. Izdatielstwo AN SSSR, Moskwa 1964.
4. A. USAKIEWICZ: Ochrona wód powierzchniowych przez stosowanie retencji w sieciach kanalizacji deszczowej. Praca doktorska, Politechnika Białostocka, Białystok 1985

MODEL FOR DETERMINING THE COMPOSITION OF STORM FLOW

The paper gives a detailed analysis of the factors affecting the quality and composition of storm flow (relief and character of the catchment area; volume and frequency of rainfall; runoff coefficient; design of the sewer network; retention of the area and sewer network, etc.). Taking these into account, a mo-

del enabling determination of the pollutants present in the storm flow (BODs, and SS concentration in the effluent from the storm sewer) has been established. The paper also includes an example of how to calculate the composition of storm flow as a function of the assumed rainfall parameters (duration, rate, frequency and volume) and the characteristics of the catchment area (length and slope of the channels).