



Modelowanie matematyczne przelewu burzowego z cylindrycznym regulatorem wirowym odpływu

Bartosz Kaźmierczak
Politechnika Wrocławska

1. Wstęp

Przelewy burzowe stosowane są głównie na kanalizacji ogólnospławnej w celu zabezpieczenia oczyszczalni ścieków przed przeciążeniem hydraulicznym w czasie deszczów nawalnych oraz zmniejszenia wymiarów kolektora za przelewem [3, 6, 7]. Zadaniem hydraulicznym przelewu burzowego jest podział maksymalnego strumienia dopływu Q_d ścieków do obiektu na dwa strumienie, tj.: odpływu do oczyszczalni Q_o oraz odpływu do odbiornika Q .

Ze względu na orientację krawędzi przelewowej przelewy podzielić można na trzy rodzaje: czołowe (prostopadłe do osi podłużnej kanału), ukośne (pod pewnym kątem do osi podłużnej kanału) oraz boczne (równoległe względem osi podłużnej kanału). Pod względem hydraulicznym, każdy z przelewów może działać w warunkach: niezatopienia lub zatopienia krawędzi przelewowej. Zarówno orientacja krawędzi przelewowej, jak i warunki działania, decydują o sprawności hydraulicznej przelewu i wpływają na dobór metody wymiarowania. Ze względów praktycznych, tj. uproszczenia konstrukcji i obniżenia kosztów budowy, w systemach kanalizacyjnych stosowane są najczęściej przelewy boczne [6, 15, 24, 25].

Przy projektowaniu przelewów należy uwzględniać ilościowe i/lub jakościowe kryteria ochrony wód odbiornika przed zanieczyszczeniem, wyrażone bądź to dopuszczalną liczbą zrzutów burzowych w ciągu roku (czasem ich trwania czy dopuszczalną objętością), bądź też dopuszczalnym stężeniem i/lub ładunkiem zanieczyszczeń, odprowadzanych

w zrzutach burzowych do odbiornika. Ochrona środowiska powinna tutaj polegać na odprowadzeniu do wód ścieków o ładunkach zanieczyszczeń dopuszczalnych z punktu widzenia zachowania w środowisku zdolności do samooczyszczenia [18].

Obligatoryjnym kryterium ilościowym w Polsce jest limitowana wartość średniej rocznej liczby zrzutów ścieków, uzależniona od rodzaju kanalizacji oraz odbiornika. Przykładowo, w komunalnej kanalizacji ogólnospławnej, ścieki z przelewów burzowych mogą być odprowadzane do śródlądowych wód powierzchniowych płynących lub przybrzeżnych, o ile średnia roczna liczba zdarzeń poszczególnych przelewów nie przekracza 10 – wg RMŚ z 2006 r. [19]. Z braku danych projektowych potrzebnych do weryfikacji powyższego kryterium, ścieki z przelewów burzowych na komunalnej kanalizacji ogólnospławnej mogą być wprowadzane do wód, jeżeli kanalizacja ta doprowadza ścieki do oczyszczalni o RLM poniżej 100 000, a w chwili rozpoczęcia działania przelewu, strumień objętości zmieszanych ścieków dopływających do przelewu jest co najmniej czterokrotnie większy, niż średni dobowy w roku strumień ścieków w okresie pogody bezopadowej $Q_{\dot{sc}(p.b.)}$.

Uwzględniając powyższe kryteria, wartość granicznego strumienia objętości Q_{gr} w kanale przed przelewem, warunkującego rozpoczęcie zrzutu ścieków do odbiornika, określić można ze wzoru:

$$Q_{gr} = Q_{\dot{sc}(p.b.)} + Q_{dgr} \quad (1)$$

gdzie Q_{dgr} to graniczny strumień dopływu ścieków deszczowych ze zlewni bezpośredniej. Należy zwrócić uwagę, że przy maksymalnym (obliczeniowym) dopływie ścieków do przelewu $Q_{d(max)}$, odpływ z przelewu do oczyszczalni $Q_{o(max)}$ będzie większy od strumienia Q_{gr} , wskutek spiętrzenia ścieków przelewających się przez krawędź przelewową. Dopuszcza się wówczas: $Q_{o(max)} = \beta Q_{gr} = (1,1 \div 1,2) Q_{gr}$ wg [6].

Wartość granicznego strumienia Q_{dgr} wyznaczyć można m.in. metodą rozcieńczeń, której istotą jest współczynnik początkowego rozcieńczenia ścieków n_{rp} (w chwili rozpoczęcia przelewania się przez krawędź przelewową), definiowany jako:

$$n_{rp} = \frac{Q_{dgr}}{Q_{\dot{sc}(p.b.)}} \quad (2)$$

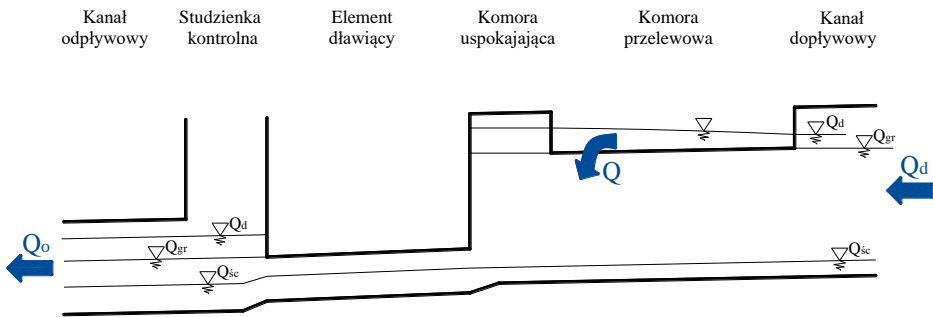
Przelewy burzowe zlokalizowane na komunalnej kanalizacji ogólnospławnej (w aglomeracjach o RLM ≤ 100000), należy projektować na rozcieńczenie początkowe $n_{rp} \geq 3$, wg [19], wówczas wzór (1) można zapisać jako [6, 8]:

$$Q_{gr} = (1 + n_{rp}) Q_{\dot{s}c(p.b.)} \quad (3)$$

Przy granicznej wartości strumienia dopływu ścieków do przelewu burzowego, wszystkie ścieki kierowane są więc do oczyszczalni, a odpływ burzowcem do odbiornika wynosi $Q = 0$ (ścieki spiętrzone są do wysokości krawędzi przelewu). Przy maksymalnym strumieniu dopływu ścieków do przelewu $Q_{d(max)}$ występuje maksymalny zrzut ścieków $Q_{(max)}$ przez krawędź przelewową:

$$Q_{(max)} = Q_{d(max)} - \beta Q_{gr} = Q_{d(max)} - \beta[(1 + n_{rp}) Q_{\dot{s}c(p.b.)}] \quad (4)$$

Na wartość $Q_{(max)}$ projektowany jest wymiar kanału burzowego, odprowadzającego ścieki do odbiornika. Schemat bocznego przelewu burzowego z elementem dławiącym przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat hydrauliczny przelewu burzowego z dławionym odpływem
Fig. 1. Situation of storm overflow with throttled outflow

Wymiarowanie przelewów burzowych opiera się jak dotychczas na przepływach maksymalnych – quasi ustalonych. Nie uwzględnia się więc zmienności strumienia ścieków w czasie. Na etapie wymiarowania, nie można zatem odpowiedzieć na pytania dotyczące krotności działania przelewu w roku, czy też czasu działania i objętości zrzutów [5, 13], a także ładunku zanieczyszczeń ścieków odprowadzanych w zrzutach

burzowych do odbiornika [14, 27]. Kontrola tych parametrów jest możliwa jedynie poprzez modelowanie hydrodynamiczne [21, 22, 23, 26].

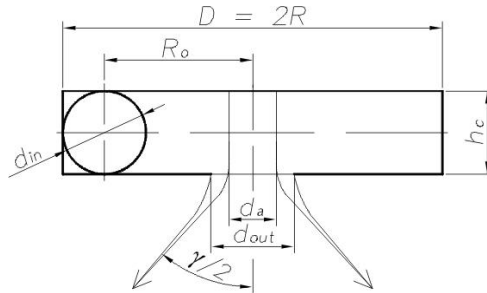
Szczegółowa procedura wymiarowania przelewów burzowych z dławionym odpływem została podana w pracy [6]. Należy zwrócić uwagę, że element dławiący w postaci klasycznej już rury dławiącej wymaga sporej ilości miejsca. Długość rury dławiącej osiąga bowiem często wartość kilkudziesięciu metrów. Znacznie mniej miejsca zajmą rozwiązania w postaci układów szeregowo połączonych łuków lub kolan [12]. W niniejszej pracy przedstawiono przelew burzowy z dławieniem odpływu do oczyszczalni za pomocą cylindrycznego regulatora wirowego, jako nowoczesnego rozwiązania do sterowania strumieniami ścieków w obiektach sieciowych typu zbiorniki retencyjne, separatory czy przelewy burzowe.

2. Regulatory wirowe

W kanalizacji, regulatory wirowe stosowane mogą być w tych miejscach sieci, gdzie wymagana jest ochrona niżej położonych obiektów przed przeciążeniem hydraulicznym. Urządzenia te zapewniają więc bezpieczeństwo działania samych sieci jak i oczyszczalni ścieków, które nie są przeciążane. Regulatory wirowe zaliczyć należy do nowoczesnych urządzeń pasywnych, o zasadzie działania opartej na dławieniu miejscowym. Wykorzystuje się tutaj energię potencjalną i kinetyczną napływającej cieczy do wymuszenia ruchu wirowego w urządzeniu. Cechuje je stosunkowo prosta budowa, niezawodność działania oraz wysoka efektywność dławienia przepływu. Współczynnik oporu miejscowego regulatora cylindrycznego osiągać może wartość $\zeta = 368$ (czemu odpowiada wartość współczynnika przepływu $\mu = 0,05$) [10, 11, 28]. Przykładowo, aby zapewnić taki sam efekt dławienia, jak w regulatorze wirowym, należałoby zastosować rurę dławiącą o długości kilkuset metrów. Najprostszymi cylindrycznymi regulatorami wirowymi (rys. 2) składają się z krótkiego przewodu (króćca) dopływowego, cylindrycznej komory wirowej oraz centralnego otworu wylotowego [6].

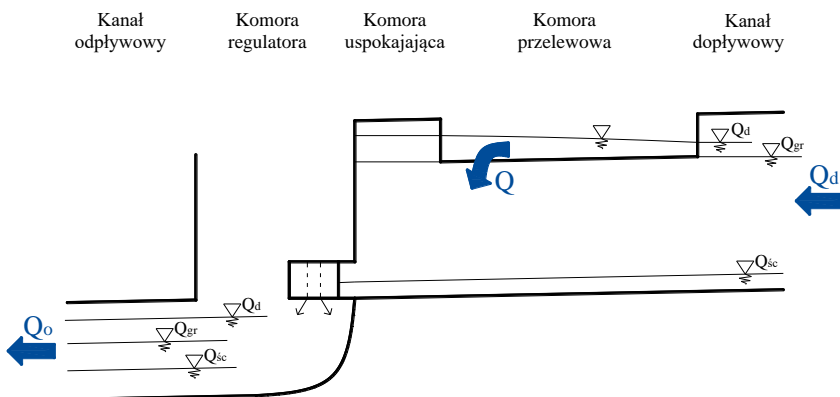
W regulatorze, o kształcie cylindra, ciecz dopływa do urządzenia przez króciec dopływowy, styczny do tworzącej cylindra, dzięki czemu nadawany jest jej ruch wirowy. W ruchu tym prędkość obwodowa zwiększa się wraz ze zbliżaniem się do osi cylindra, a dzięki sile odśrodkowej, w komorze wirowej ciśnienie maleje w kierunku jej osi, aby na

powierzchni rdzenia powietrznego osiągnąć ciśnienie otoczenia. Wytwarzający się tutaj rdzeń gazowy ma wpływ na skuteczność dławiącego działania urządzenia.



Rys. 2. Parametry konstrukcyjne i eksploatacyjne regulatora wirowego
Fig. 2. Geometrical and operational parameters of vortex flow regulator

W regulatorach wirowych dochodzi do napowietrzenia strumienia cieczy wypływającej z komory wirowej. Efekt napowietrzający jest rzędu $4 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$, co ma istotne znaczenie technologiczne. Większość odorów w obiektach gospodarki komunalnej powstaje w wyniku rozkładu substancji organicznych z udziałem bakterii beztlenowych, a najważniejszym produktem tych przemian jest siarkowodór. W płynących kolektorach ściekach następuje relatywnie szybkie zużycie tlenu na rozkład substancji organicznych i zapoczątkowanie procesów beztlenowych [2, 16].



Rys. 3. Schemat hydrauliczny przelewu burzowego z regulatorem wirowym
Fig. 3. Situation of storm overflow with vortex flow regulator

Wymiarowanie cylindrycznych regulatorów wirowych należy rozpocząć od doboru średnicy króćca dopływowego d_{in} dla zakładanego strumienia objętości odpływu ścieków do oczyszczalni Q_o przy spełnieniu relacji [6, 10]:

$$d_{in} \leq 5 \sqrt{\frac{16Q_o^2}{g\pi^2}} \quad (5)$$

co zapewni (z kryterium Froude'a) zachowanie w regulatorze warunków w pełni rozwiniętego ruchu wirowego ($Fr > 1$), przy czym $d_{in \min} = 0,30$ m (w kanalizacji ogólnospławnej). Dla przyjętych wartości strumienia Q_o i naporu H oraz ustalonej średnicy d_{in} króćca dopływowego do regulatora, należy obliczyć wymaganą wartość współczynnika przepływu μ z wzoru:

$$\mu = \frac{4Q_o}{\pi d_{in}^2 \sqrt{2gH}} \quad (6)$$

Wysokość (h_c) i średnicę cylindra (D) regulatora należy dobrać, z zalecanego w pracach [6, 28] zakresu racjonalnych ich wartości. Mianowicie, efektywna pod względem dławienia, konstrukcja regulatora cylindrycznego powinna zawierać następujące wartości stosunków: $h_c/d_{in} \in [1; 1,5]$ oraz $D/d_{in} \in [3; 4]$, przy spełnieniu warunku wolnego przelotu kuli ($d_{out} \geq d_{in}$) odnośnie stosunku średnic regulatora: $d_{out}/d_{in} \in [1; 1,5]$ – istotnego zwłaszcza dla ścieków. Promień zawirowania cieczy R_o na wlocie do regulatora, obliczany jest z wzoru (rys. 2):

$$R_o = \frac{D - d_{in}}{2} \quad (7)$$

Dobór średnicy otworu odpływowego d_{out} regulatora prowadzić należy iteracyjnie. Mianowicie, w pierwszej iteracji należy założyć średnicę tego otworu równą średnicy króćca dopływowego ($d_{out} = d_{in}$) i obliczyć wartość stałej K regulatora cylindrycznego, z wzoru postaci:

$$K = \frac{R_o r_{in}^2}{r_{out}^3} = \frac{2R_o d_{in}^2}{d_{out}^3} \quad (8)$$

a następnie obliczyć w 1. przybliżeniu wartość współczynnika przepływu $\mu_{(1)}$. Średnicę otworu wylotowego d_{out} należy zmieniać dyskretnie, aż do momentu uzyskania zgodności wymaganej wartości μ z obliczoną $\mu_{(i)}$ – w i -tym kroku iteracyjnym, z przyjętą dokładnością:

$$\delta = \left| \frac{\mu - \mu_{(i)}}{\mu} \right| \cdot 100\% \leq 1\% \quad (9)$$

Współczynnik przepływu regulatora, o przyjętych parametrach konstrukcyjnych (h_c/d_{in} , D/d_{in} , d_{out}/d_{in}), obliczyć można ze wzoru:

$$\begin{aligned} \mu = & K^{-0,189} + \left(\frac{d_{out}}{d_{in}} \right)^{0,064} + \left(\frac{h_c}{d_{in}} \right)^{-0,019} \\ & + \left(\frac{d_a}{d_{out}} \right)^{-0,040} - 0,551 \tan \frac{\gamma}{2} - 2,97 \end{aligned} \quad (10)$$

przy czym stosunek średnicy rdzenia powietrznego do średnicy otworu odpływowego

$$\frac{d_a}{d_{out}} = 1,80 - K^{0,084} - 0,050 \frac{d_{out}}{d_{in}} - 0,0061 \frac{h_c}{d_{in}} + 0,0122 \frac{D}{d_{in}} \quad (11)$$

oraz tangens kąta $\gamma/2$ rozpylenia cieczy

$$\tan \frac{\gamma}{2} = 2,38 K^{0,561} \left(\frac{d_{out}}{d_{in}} \right)^{2,16} \left(\frac{h_c}{d_{in}} \right)^{-0,080} \left(\frac{D}{d_{in}} \right)^{-0,896} \quad (12)$$

Po określeniu współczynnika $\mu_{(i)}$ (z ostatniego przybliżenia), przepustowość zaprojektowanego regulatora z przekształconego na Q_o wzoru (6), wyniesie:

$$Q_o = \mu_{(i)} \frac{\pi d_{in}^2}{4} \sqrt{2gH} \quad (13)$$

3. Przykładowy przelew burzowy z regulatorem wirowym

Na potrzeby modelowania działania przelewu burzowego zaproponowano przykładową zlewnię ogólnospławną o powierzchni $F = 60$ ha. Przyjmując zastępczy współczynnik spływu powierzchniowego

deszczu ze zlewni $\psi = 0,25$, jej powierzchnia zredukowana wyniesie $F_{zr} = 15$ ha. Przyjęto przeciętną gęstość zaludnienia 100 mieszkańców na hektar, stąd oszacowano liczbę mieszkańców na 6000. Na podstawie założeń niemieckich [1, 20], jako miarodajny odpływ ścieków bytowo-gospodarczych przyjęto wskaźnik jednostkowy (na mieszkańca) $q_j = 0,005$ dm³/s, skąd ustalono strumień odpływu ścieków bytowych z modelowej zlewni na 0,030 m³/s. Ponadto założono, że czas przepływu w kolektorze miarodajny do wymiarowania przelewu wynosi $t = 15$ minut. Strumień ścieków deszczowych obliczono ze wzoru na maksymalną wysokość opadu (w mm) w warunkach wrocławskich [4, 9], przyjmując częstość deszczu obliczeniowego $C = 2$ lata [17]:

$$h = -4,583 + 7,412t^{0,242} + (97,105t^{0,0222} - 98,675) \left(-\ln \frac{1}{C} \right)^{0,809} \quad (14)$$

Całkowity strumień objętości dopływu ścieków do przelewu burzowego, po dodaniu ścieków bytowych, wynosi: $Q_d = 2,167 + 0,030 = 2,197$ m³/s. Rozdział strumieni ścieków określono metodą rozcieńczeń, przyjmując współczynnik rozcieńczenia początkowego $n_{rp} = 4$, mając na uwadze weryfikację dopuszczalnej liczby zrzutów burzowych do odbornika, mniejszą od 10 w roku. Graniczny strumień dopływu ścieków ogólnospławnych do przelewu, wg (3), wyniesie więc: $Q_{gr} = (1 + 4)Q_{\dot{sc}(p,b)} = 0,150$ m³/s.

Na podstawie przyjętego rozdziału ścieków na przelewie oraz przy założeniu, że maksymalny strumień objętości odpływu ścieków w kierunku oczyszczalni ścieków wynosić może $Q_o = 1,2Q_{gr} = 0,180$ m³/s, wyznaczono parametry przelewu burzowego przy użyciu programu *PRZELEW* [5]. Program pozwala dobierać parametry przelewów burzowych z rurą dławiącą lub układem kolan bądź łuków, nie zawiera natomiast opcji z regulatorem wirowym.

W pierwszej kolejności wyznaczono parametry przelewu burzowego z rurą dławiącą:

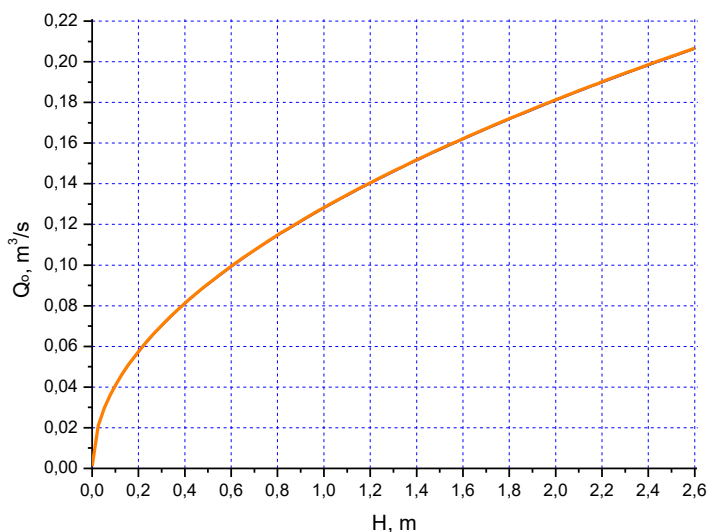
- kanał dopływowy jajowy 1,50x2,25 m o spadku dna $i = 1,0$ ‰,
- krawędź przelewową o wysokości $p = 1,40$ m i długości $l_p = 3,10$ m,
- wysokość warstwy przelewowej na końcu krawędzi przelewowej $h_k = 0,59$ m,
- rura dławiąca o średnicy $d_r = 0,30$ m, długości $l_r = 36,6$ m i spadku dna $i_r = 3,33$ ‰,

- kanał odpływowy do oczyszczalni J0,60x0,90 m o spadku dna $i_o = 1,67 \text{ ‰}$.
- kanał burzowy J1,50x2,25 m o spadku dna $i = 1,0 \text{ ‰}$.

W następnej kolejności obliczono parametry regulatora wirowego, który zastąpi rurę dławiącą. Dla projektowanej wartości naporu $H = p + h_k = 1,99 \text{ m}$ i przyjętej wartości strumienia objętości odpływu ścieków $Q_o = 0,180 \text{ m}^3/\text{s}$ obliczono średnicę króćca dopływowego z wzoru (5): $d_{in} = 0,35 \text{ m}$, dla której $Fr = 1,02$. Wymaganą wartość współczynnika przepływu $\mu = 0,30$ obliczono z wzoru (6). Następnie przyjęto racjonalne wartości stosunków: $h_c/d_{in} = 1,5$ i $D/d_{in} = 3,0$. Wówczas wysokość cylindra $h_c = 0,53 \text{ m}$ a średnica $D = 1,05 \text{ m}$. Promień zawirowania cieczy na wlocie do regulatora, z wzoru (7), wyniesie $R_o = 0,35 \text{ m}$. Następnie przyjęto średnicę otworu odpływowego $d_{out(1)} = d_{in} = 0,35 \text{ m}$ i obliczono z wzoru (8) wartość stałej $K_{(1)} = 2,00$. Stosunek średnicy rdzenia powietrznego do średnicy otworu odpływowego, wg (11), wyniesie wówczas $d_a/d_{out} = 0,717$ a tangens kąta rozpylenia cieczy wg (12): $\tan(\gamma/2) = 1,269$. Na tej podstawie wartość współczynnika przepływu z wzoru (10) wyniesie $\mu_{(1)} = 0,214$. Ponieważ obliczona wartość $\mu_{(1)}$ różni się znacznie od wymaganej $\mu = 0,30$, w drugiej iteracji przyjęto większą wartość $d_{out(2)} = 0,51 \text{ m}$ i obliczono nową wartość $K_{(2)} = 0,650$, a następnie nowe wartości: $d_a/d_{out(2)} = 0,790$ oraz $\tan(\gamma_{(2)}/2) = 1,524$, stąd obliczono $\mu_{(2)} = 0,301$. Błąd względny obliczonej w drugiej iteracji wartości współczynnika przepływu $\mu_{(2)}$ od wymaganej wartości μ wyniesie $\delta = 0,3\%$, co spełnia warunek (9). W efekcie, zgodnie z (13), przepustowość zaprojektowanego regulatora cylindrycznego wyniesie:

$$Q_o(H) = 0,128\sqrt{H} \quad (15)$$

Przykładowo, dla projektowanej wartości naporu $H = 1,99 \text{ m}$ otrzymamy $Q_o = 0,181 \text{ m}^3/\text{s}$. Charakterystyka hydrauliczna cylindrycznego regulatora wirowego z przykładu obliczeniowego została przedstawiona na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyka hydrauliczna regulatora wirowego

Fig. 4. Hydraulic characteristic of vortex regulator

4. Modelowanie matematyczne

Model działania przelewu burzowego z cylindrycznym regulatorem wirowym obejmuje opis procesów: dopływu ścieków do obiektu, odpływu do oczyszczalni, przelewu przez krawędź boczną do odbiornika, a także retencji w komorze przelewowej. Zmiana w czasie (t) objętości (V) ścieków w komorze przelewowej wynosi:

$$dV(t) = Q_d(t)dt - Q_o(t)dt - Q(t)dt \quad (16)$$

Zarówno strumień odpływu ścieków Q_o do oczyszczalni, jak i strumień zrzutu ścieków Q przez przelew boczny, zależne są od wysokości napełnienia H komory przelewowej.

Strumień objętości odpływu ścieków w kierunku oczyszczalni obliczany jest ze wzoru (13). Zrzut ścieków do odbiornika następuje w przypadku, gdy wypełnienie H przekracza wysokość p krawędzi przelewowej i obliczany jest ze wzoru:

$$Q = \frac{2}{3} l_p \mu_p \sqrt{2g} (H - p)^{3/2} \quad (17)$$

przy czym μ_p to współczynnik przepływu przelewu bocznego wg zależności [6, 7]:

$$\mu_p = 0,64 - 0,052q_r + 0,0088L_0 + 0,035W_0 - 0,075Fr_0 - 0,065K_0 \quad (18)$$

gdzie:

q_r – współczynnik rozdziału przepływów na przelewie: $q_r = Q/Q_d$,
 L_0 – względna długość krawędzi przelewowej: $L_0 = l_p/H_a$, gdzie
 $H_a = p + h_a$ (h_a – wysokość warstwy przelewowej na początku przelewu),

W_0 – względna wysokość warstwy przelewowej na początku przelewu: $W_0 = h_a/H_a$,

Fr_0 – liczba Froude'a w początkowym przekroju poprzecznym komory przelewowej: $Fr_0 = Q_d/(A_0(Q_{d\ sp}) g^{0,5} H_a^{0,5})$,

$A_0(Q_{d\ sp})$ – pole powierzchni przekroju poprzecznego spiętrzonego strumienia Q_d , na początku komory przelewowej, m^2 .

K_0 – współczynnik kształtu komory przelewowej na jej początku: $K_0 = bH_a/A_0(Q_{d\ sp})$, gdzie b to szerokość kanału dopływowego.

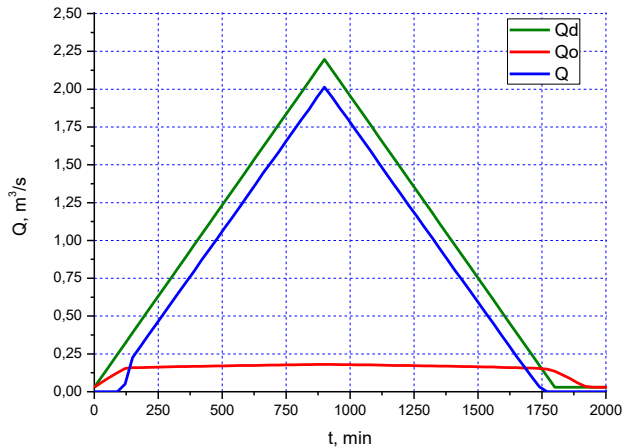
Na podstawie sformułowanych modeli hydraulicznego i matematycznego funkcjonowania przelewu opracowano program komputerowy *SYMULACJE* do numerycznego opisu jego działania. Założono trójkątny hydrogram dopływu ścieków deszczowych do przelewu (rys. 5).

Wyniki przeprowadzonej symulacji przedstawiono w tabeli 1. Ze-stawiono kolejno strumienie dopływu Q_d , odpływu Q_o i zrzutu ścieków przez przelew Q , a także sumaryczną objętość dopływu V_d , odpływu V_o , i zrzutu ścieków V oraz wysokość napełnienia ścieków H . Z uwagi na dużą liczbę danych wynikowych, w tabeli 1 przedstawiono charakterystyczne wartości z 60 sekundowym krokiem czasowym.

Przy zadanym obciążeniu, przelew zacznie zrzucić ścieki do kanału burzowego w 120 s dopływu ścieków. W 900 s wystąpi maksymalny chwilowy zrzut ścieków wartości $Q_{(\max)} = 2,014 m^3/s$, przy dopływie $Q_{d(\max)} = 2,197 m^3/s$. Zrzut ścieków będzie trwał do 1740 s (27 minut). Łączna objętość zrzuconych w tym czasie ścieków do odbiornika wyniesie $V = 1702 m^3$, natomiast w kierunku oczyszczalni popłynie objętość $V_o = 306 m^3$ (łącznie $V_d = 2008 m^3$). Hydrogramy przepływów ścieków przedstawiono na rysunku 5.

Tabela 1. Wyniki symulacji działania przelewu burzowego**Table 1.** The results of the simulation of a storm overflow functioning

t , s	Q_d , m^3/s	Q_o , m^3/s	Q , m^3/s	V_d , m^3	V_o , m^3	V , m^3	H , m
0	0,030	0,030	0,000	0,0	0,0	0,0	0,05
60	0,174	0,096	0,000	6,2	3,8	0,0	0,57
120	0,319	0,154	0,051	21,1	11,4	0,1	1,45
180	0,463	0,160	0,298	44,6	20,9	13,4	1,56
240	0,608	0,162	0,442	76,8	30,6	35,6	1,60
300	0,752	0,165	0,585	117,7	40,4	66,5	1,65
360	0,897	0,167	0,727	167,3	50,3	105,9	1,69
420	1,041	0,168	0,871	225,5	60,4	153,8	1,73
480	1,186	0,170	1,011	292,4	70,5	210,4	1,76
540	1,330	0,172	1,154	367,9	80,8	275,5	1,79
600	1,475	0,173	1,299	452,1	91,1	349,2	1,83
660	1,619	0,175	1,445	545,0	101,6	431,5	1,86
720	1,764	0,176	1,582	646,6	112,1	522,4	1,89
780	1,908	0,178	1,729	756,8	122,8	621,9	1,92
840	2,053	0,179	1,869	875,7	133,5	730,0	1,95
900	2,197	0,181	2,014	1003,2	144,3	846,6	1,98
960	2,053	0,179	1,874	1130,6	155,1	963,3	1,95
1020	1,908	0,178	1,733	1249,4	165,8	1071,5	1,92
1080	1,764	0,177	1,592	1359,5	176,4	1171,0	1,89
1140	1,619	0,175	1,445	1460,9	187,0	1262,0	1,86
1200	1,475	0,174	1,303	1553,6	197,4	1344,4	1,83
1260	1,330	0,172	1,162	1637,7	207,8	1418,3	1,80
1320	1,186	0,170	1,019	1713,1	218,1	1483,6	1,76
1380	1,041	0,169	0,875	1779,8	228,2	1540,3	1,73
1440	0,897	0,167	0,734	1837,9	238,3	1588,5	1,69
1500	0,752	0,165	0,592	1887,3	248,2	1628,2	1,65
1560	0,608	0,163	0,451	1928,0	258,0	1659,3	1,61
1620	0,463	0,160	0,309	1960,1	267,7	1682,0	1,56
1680	0,319	0,157	0,168	1983,5	277,3	1696,2	1,50
1740	0,174	0,154	0,032	1998,2	286,6	1702,1	1,43
1800	0,030	0,135	0,000	2004,3	295,3	1702,4	1,11
1860	0,030	0,087	0,000	2006,1	301,9	1702,4	0,46
1920	0,030	0,035	0,000	2007,9	305,5	1702,4	0,07



Rys. 5. Hydrogramy: dopływu ścieków do przelewu, odpływu na oczyszczalnię oraz odpływu przez przelew do kanału burzowego

Fig. 5. The hydrographs of the sewage inflow towards the overflow, the outflow towards the sewage-treatment plant and the outflow to the storm drain through the overflow

Hydrogramy na rysunku 5 potwierdzają odpowiedni stopień ochrony oczyszczalni ścieków przed przeciążeniem hydraulicznym, poprzez zastosowanie regulatora wirowego na przelewie burzowym. Maksymalny strumień odpływu w kierunku oczyszczalni ścieków wynosi $Q_o = 0,181 \text{ m}^3/\text{s}$. Współczynnik przepływu przelewu bocznego wynosi wówczas $\mu_p = 0,520$, przy czym wartość tego współczynnika zmieniała się w zakresie $\mu_p \in [0,520; 0,560]$, w zależności od wysokości warstwy przelewowej.

3. Podsumowanie i wnioski

Dotychczasowe metody wymiarowania przelewów burzowych nie uwzględniają zarówno częstości zrzutów burzowych do odbiornika, jak i nie dają możliwości określenia czasu ich trwania oraz objętości, a przez to i ładunku zanieczyszczeń odprowadzanych w zrzutach do odbiorników. Symulacje działania przelewów burzowych pozwalają określić te parametry dla zaprojektowanego już przelewu i dowolnie zadane-go obciążenia. Są więc cennym narzędziem wspomagającym proces projektowania tego typu obiektów, co wykazano w pracy.

Przeprowadzona w pracy przykładowa symulacja działania przelewu burzowego na kanalizacji ogólnospławnej wykazała wysoki stopień ochrony oczyszczalni ścieków przed przeciążeniem hydraulicznym przy zastosowaniu przelewu bocznego z cylindrycznym regulatorem wirowym. Regulatory cylindryczne cechują się bardzo wysoką efektywnością dławienia strumienia objętości cieczy. Podkreśla to ich wysoką przydatność techniczną. W przedstawionym w pracy przykładzie obliczeniowym, cylindryczny regulator wirowy o średnicy $D = 1,05$ m i wysokości cylindra 0,53 m uzyskuje ten sam efekt dławienia hydraulicznego, co rura dławiąca o średnicy 0,30 m i długości ok. 37 m.

Literatura

1. Arbeitsblatt DWA-A118: *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungs-systemen*. DWA, Hennef, 2006.
2. **Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M., Białowiec A.:** *Wykorzystanie reakcji Fentona do ograniczania procesu zagniwania i powstawania siarkowodoru w ściekach komunalnych*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 10, 289–300 (2008).
3. **Fidala-Szope M.:** *Ochrona wód powierzchniowych przed zrzutami z kanalizacji deszczowej i półrozdzielczej*. Poradnik. Wyd. IOŚ, Warszawa, 1997.
4. **Kaźmierczak B., Kotowski A.:** *DDF rainfall model for dimensioning and modelling of Wrocław drainage systems*. Environment Protection Engineering. Vol. 38, nr 4, 127–138 (2012).
5. **Kaźmierczak B., Kotowski A.:** *Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2012.
6. **Kotowski A.:** *Podstawy bezpiecznego projektowania kanalizacji*. Wyd. Seidel-Przywecki, Warszawa, 2011.
7. **Kotowski A.:** *Podstawy wymiarowania bocznych przelewów burzowych z rurą dławiącą*. Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1998.
8. **Kotowski A.:** *Projektowanie separatorów i przelewów burzowych na kanalizacji deszczowej*. Ochrona Środowiska. Nr 2, 25–30 (2000).
9. **Kotowski A., Kaźmierczak B., Dancewicz A.:** *Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji*. Wydawnictwo Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Instytut Podstawowych Problemów Techniki. Studia z zakresu inżynierii nr 68, Warszawa, 2010.
10. **Kotowski A., Wójtowicz P.:** *Analysis of hydraulic parameters of cylindrical vortex regulators*. Environment Protection Engineering. Vol. 34, nr 2, 43–56 (2008).

11. **Kotowski A., Wójtowicz P.:** *Analysis of hydraulic parameters of conical vortex regulators.* Polish Journal of Environ. Stud. Vol. 19, nr 4, 749–756 (2010).
12. **Kotowski A., Wójtowicz P.:** *The new method for limiting outflow from storm overflows.* Environment Protection Engineering. Vol. 33, nr 4, 41–53 (2007).
13. **Lau J., Butler D., Schütze M.:** *Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact?* Urban Water 4, 181–189 (2002).
14. **Lee S., Lee J., Kim M.:** *The Influence of Storm-Water Sewer Overflows on Stream Water Quality and Source Tracking of Fecal Contamination.* KSCE Journal of Civil Engineering. Vol. 16, nr 1, 39–44 (2012).
15. **Oliveto G., Biggiero V., Fiorentino M.:** *Hydraulic features of supercritical flow along prismatic weirs.* Journal of Hydraulic Research. Vol. 39, nr 1, 73–82 (2001).
16. **Piecuch T., Kowalczyk A., Kupś D., Gomółka D.:** *Sposób likwidacji uciążliwych zapachów powstających w procesie mechanicznego odwadniania komunalnych osadów ściekowych.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection), 13, 747–768 (2011).
17. **PN-EN 752:** *Drain and sewer systems outside buildings.* PKN, Warszawa 2008.
18. **Przybyła C., Bykowski J.:** *Efektywność funkcjonowania gminnych oczyszczalni ścieków.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set of Environment Protection), 11, 231–239 (2009).
19. **Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych.** Dz. U. Nr 137 z dnia 31 lipca 2006 r. (poz. 984).
20. **Schmitt T.:** *Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 "Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen".* DWA, Hennef, 2000.
21. **Schmitt T., Thomas M., Etrich N.:** *Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems.* Journal of Hydrology. Vol. 299, 300–311 (2004).
22. **Schütze M.R., Butler D., Beck M.B.:** *Modelling simulation and control of urban waste water systems.* Springer-Verlag, London, 2002.
23. **Słyś D., Stec A.:** *Hydrodynamic modelling of the combined sewage system for the city of Przemyśl.* Environment Protection Engineering. Vol. 38, nr 4, 99–112 (2012).
24. **Singh R., Manivannan D., Satyanarayana T.:** *Discharge coefficients of rectangular side weirs.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 120, nr 4, 814–820 (1994).

25. **Swamee P.K., Pathak S.K., Ali M.S.:** *Side-weir analysis using elementary discharge coefficient.* Journal of Irrigation and Drainage Engineering. Vol. 120, nr 4, 742–755 (1994).
26. **Weyand M.:** *Real-time control in combined sewer systems in Germany – some case studies.* Urban Water 4, 347–354 (2002).
27. **Weyrauc P, Matzinger A., Pawlowsky-Reusing E., Plume S., von Seggern D., Heinzmann B., Schroeder K., Rouault P.:** *Contribution of combined sewer overflows to trace contaminant loads in urban streams.* Water Research 44, 4451–4461 (2002).
28. **Wójtowicz P., Kotowski A.:** *Influence of design parameters on throttling efficiency of cylindrical and conical vortex valves.* Journal of Hydraulic Research. Vol. 47, nr 5, 559–565 (2009).

Mathematical Modeling of Storm Overflow with a Cylindrical Vortex Regulator

Abstract

A simulation of the functioning of a modern overfall with a cylindrical vortex regulator on a combined sewage system was conducted in this work. In a cylindrical vortex regulator, liquid flows into the device through a connector tangent to the cylinder generator. From this, the liquid receives a vortex motion, which is maintained throughout the entire chamber width all the way to an outlet hole on the cylinder head. In the motion, peripheral speed is increased when approaching the cylinder axis. Because of the centrifugal force in the vortex chamber, the pressure decreases towards its axis until it reaches an ambient pressure on the air core surface. The air core being generated has a crucial influence on the throttling efficiency of the device. The atomized liquid in the outflow creates a cone with the angle of flare γ .

For the modelling of storm overflow activity a combined drainage area of $F = 60$ ha was suggested. The overfall was loaded with sewage and wastewater. A typical, triangular hydrograph of the wastewater inflow to the storm overflow was applied here. The given hydraulic model of storm overflow activity includes a series of characteristic, occurring in sequence phases of filling and emptying of the overfall chamber. The phases were distinguished with the description of boundary conditions in reference to the precisely determined range of variables during the fillings and flows. On the basis of the formulated hydraulic and mathematical models of the storm overflow activity, a computer programme for the numerical simulation of the functioning of the aforementioned overflows was developed.

The simulation of a storm overflow functioning on a combined sewage system proved a high level of sewage-treatment plant protection from a hydraulic overload by the application of modern, unconventional storm overflows. Irrespective of the assigned load, sewage outflow stream towards the sewage-treatment plant is stabilized on a demanded level.

Current methods of designing storm overflows do not take into account the frequency of storm discharges to the receiver, as well as they do not offer the possibility of their duration and volume determination and thus they do not allow for the assessment of pollution load that is drained off in discharges towards receivers. The simulations of storm overflows functioning allow for determination of these parameters for already designed overflow and for any assigned load. Therefore they constitute a valuable instrument supporting the process of designing this type of objects, as it has been proved in this work.