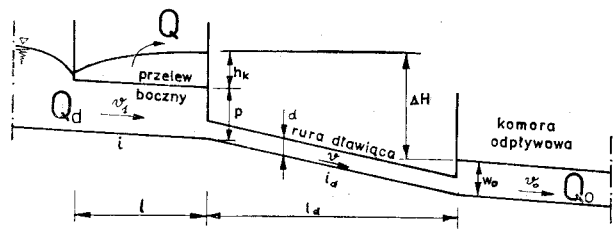


Andrzej Kotowski  
Edward Wł. Mielcarzewicz

## BADANIA MODELOWE PRZEWÓW BURZOWYCH O REGULOWANYM ODPLYWIE

Przelewy burzowe stosowane są w systemach usuwania ścieków w celu regulacji natężenia odpływu w kolektorach, w czasie spływu ścieków deszczowych, pochodzących z deszczów nawalnych. Obecnie powszechnie stosuje się przelewy boczne i czołowe, przy czym napełnienie kolektora oraz wysokość wzniesienia krawędzi przelewowej zależy od przekroju i spadku dna kanału, a także od przyjętego krytycznego natężenia przepływu. Wobec dużej bezwładności płynących ścieków, długość krawędzi przelewu bocznego musi być bardzo znaczna — nierzadko osiąga kilkadziesiąt metrów. To sprawia, że przelewy burzowe są bardzo kosztowne, a ich stosowanie mało opłacalne, gdyż uzyskane oszczędności na skutek zmniejszenia wymiarów kolektora dość rzadko kompensują koszty budowy przelewów. Ponadto jeśli natężenie przepływu ścieków płynących kolektorem przekroczy założone w projekcie natężenie obliczeniowe, to również natężenie odpływu do oczyszczalni ulega niekiedy nawet znacznemu nie kontrolowanemu zwiększeniu. Tych mankamentów pozbawione są w znacznej mierze przelewy z odpływem regulowanym za pomocą tzw. rury dławiącej (rys. 1).



Rys. 1 Schemat przelewu bocznego z rurą dławiącą

Zasada działania tych przelewów sprowadza się do tego, że odpływ ścieków z komory przelewowej do oczyszczalni odbywa się poprzez odcinek rury o tak dobranej średnicy i długości, aby odpływ ten mieścił się w ściśle określonych granicach. Rura dławiąca powoduje spiętrzenie ścieków w komorze przelewowej, co umożliwia zakładanie krawędzi przelewu znacznie wyżej niż w przelewach konwencjonalnych, co z kolei znacznie zwiększa retencję sieci i zmniejsza częstotliwość działania przelewu. Wobec całkowicie odmiennych warunków energetycznych, jakie występują w komorze prze-

lewowej, krawędź przelewu bocznego może być kilkakrotnie krótsza niż w przelewach konwencjonalnych, toteż i koszt budowy przelewu jest odpowiednio niższy. Rozpowszechnienie przelewów burzowych o regulowanym odpływie przyczynić się może do znacznego obniżenia kosztów budowy systemów kanalizacyjnych.

W obliczeniach przelewów o regulowanym odpływie ustala się najczęściej maksymalne natężenie zrzutu ścieków do odbiornika oraz wzniesienie krawędzi przelewu nad dnem kanału. Obliczenia hydrauliczne takiego przelewu sprowadzają się wówczas do wyznaczenia długości krawędzi przelewowej, przez którą odbywać się będzie zrzut ścieków do burzowca, przekroju burzowca, a ponadto przekroju i długości rury dławiącej. Długość krawędzi przelewowej wyznacza się jak dotychczas, stosując odpowiednio zmodyfikowane wzory na wydajność przelewów czołowych bądź bocznych — przy braku piętrzenia, jak np.: wzór Poleniego, Engelsa, Pawłowskiego, Schaffernaka bądź Forchheimera [1, 3, 4], co prowadzić może do znacznych błędów.

### Cel i zakres badań

Celem badań było wszechstronne zbadanie na modelu przelewu burzowego zjawisk hydraulicznych, towarzyszących działaniu jednostronnych przelewów bocznych z rurą dławiącą i podjęcie próby ich matematycznego opisu. Pomiarami objęto następujące wielkości:

- napełnienie kanału przed przelewem, przy różnym przepływie i spadku dna kanału — bez działania przelewu bocznego,
- napełnienie kanału i ukształtowanie się zwierciadła wody w kanale i nad krawędzią przelewową — podczas działania przelewu bocznego, lecz przy zamkniętym odpływie do rury dławiącej; przy różnych przepływach, spadkach dna, długościach krawędzi przelewowej i wysokościach wzniesienia tej krawędzi ponad dnem kanału,
- jw., lecz przy częściowym odpływie wody przez rurę dławiącą i przy różnych stosunkach ilości wody odpływającej przez przelew i rurę dławiącą.

### Stanowisko doświadczalne i metodyka badań

Do budowy stanowiska doświadczalnego przyjęto następujące założenia:

- skala geometryczna modelu  $\xi_1=15$

- kanał przed przelewem ma przekrój prostokątny o wymiarach: szer./wys.=100/160 mm (w warunkach naturalnych 1,5/2,4 m) oraz długość 5 m (75 m)
- krawędź przelewowa jest równoległa do dna kanału
- parametry geometryczne i eksploatacyjne modelu zmienione mogą być dyskretnie w zakresie następujących wartości:
- spadek kanału i  $\epsilon < 1,0$ ;  $10,0 > \text{‰}$
- wzniesienia krawędzi przelewowej ponad dnem kanału  $p_{\epsilon} < 25$ ;  $75 > \text{mm}$  (w warunkach naturalnych 0,375÷1,125 m)
- długość krawędzi przelewowej  $l_{\epsilon} < 100$ ;  $300 > \text{mm}$  (1,5—4,5 m)
- natężenie przepływu wody w kanale:  $Q_d \epsilon < 1,0$ ;  $3,0 > \text{dm}^3/\text{s}$  (0,87—2,61  $\text{m}^3/\text{s}$ )
- prędkość przepływu w kanale  $V_d \epsilon < 0,4$ ;  $0,9 > \text{m/s}$  (1,5—3,3  $\text{m/s}$ )
- stosunek ilości wody dopływającej do przelewu  $Q_d$  do odpływającej przez element dławiący  $Q_o$ :  $Q_d/Q_o \epsilon < 2,5$ ;  $15,0 >$ .

Wykonane przy wymienionych założeniach stanowisko doświadczalne składało się z trzech zasadniczych elementów:

- układu zasilającego w wodę,
- kanału dopływowego z przelewem bocznym i elementem regulującym odpływ (modelującym rurę dławiącą) wraz z komorą odpływową,
- urządzeń i przyrządów pomiarowych.

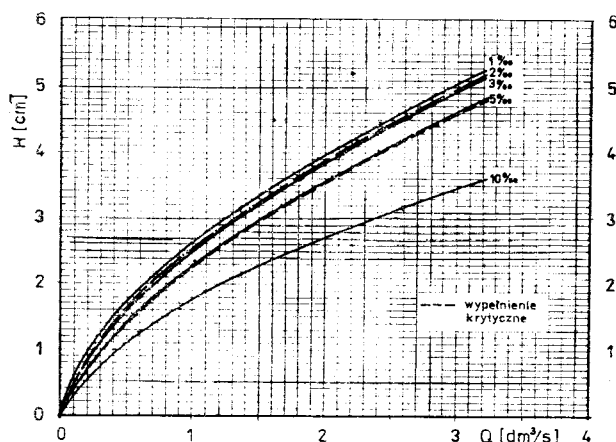
Woda z sieci wodociągowej dopływała do zbiornika górnego, skąd kierowana była do pierwszego trójkątnego przelewu pomiarowego, a następnie do kanału dopływowego. Woda przepływająca przez krawędź przelewu bocznego kierowana była do drugiego trójkątnego przelewu pomiarowego, a następnie do zbiornika dolnego, skąd była przepompowywana do zbiornika górnego. Woda przepływająca przez element regulujący odpływ kierowana była do komory odpływowej, a następnie do przepływomierza pływakowego (rotametu) i do kanalizacji.

Kanał dopływowy umieszczony został na specjalnej konstrukcji podtrzymującej, o regulowanym pochyleniu podłużnym w stosunku do poziomu. W bocznej ścianie odcinka końcowego kanału dopływowego wykonano przelew boczny o zmiennych parametrach krawędzi przelewowej, zarówno co do jej długości ( $l=100$ , 200 i 300 mm), jak i wysokości położenia w stosunku do dna kanału ( $p=27$ , 52 i 77 mm). Łącznie zastosowano 9 zmian parametrów krawędzi przelewu bocznego. W ścianie czołowej zamkającej kanał dopływowy zainstalowano giętki przewód gumowy  $\phi$  30 mm z zaworem odcinającym  $\phi$  25 mm stanowiącym element regulujący odpływ wody. Komora odpływowa umożliwia zmiany wysokości położenia zwierciadła przepływającej przez nią wody, w stosunku do zwierciadła wody przed wlotem do elementu regulującego.

Zastosowane w modelu trójkątne przelewy pomiarowe wzorcowano metodą objętościową, uzyskując zgodność wyników ze wzorem:

$$H = 0,874 Q^{2/5} \quad (1)$$

Charakterystyki hydrauliczne kanału dopływowego, uzyskane na podstawie pomiarów wypełnienia kanału, przy różnym spadku podłużnym oraz zmienianym dyskretnie natężeniu przepływu wody, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Charakterystyka przepływu kanału prostokątnego,  $b_k=10 \text{ cm}$

Na rysunku tym linią przerywaną zaznaczono wypełnienie krytyczne kanału, określone ze wzoru [3, 5]:

$$H_{kr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha_1 Q_d^2}{b_k^2 g}} \quad (2)$$

gdzie:  $\alpha_1$  — współczynnik korelacyjny Saint-Venanta; wg Rehbocka [5]  $\alpha_1=1,087$ .

Całość pomiarów podzielono na 9 zadań, wg zmian geometrii krawędzi przelewowej, co do jej wysokości położenia ( $p$ ) względem dna kanału oraz długości ( $l$ ). Każde zadanie podzielono na 3 serie wg wielkości dopływu ( $Q_d$ ) wody do kanału przepływowego, tj.:  $Q_d=1$ ; 2 i 3  $\text{dm}^3/\text{s}$ . W każdej serii przyjmowano po 3 warianty spadku podłużnego kanału:  $i=1$ ; 5 i 10 $\text{‰}$ . W każdym wariantcie wyodrębniono 4 subwarianty drogą zmian wielkości odpływu wody ( $Q_o$ ) przez element dławiący w stosunku do  $Q_d$ , przy czym pierwszy subwariant odnosił się do zamkniętego elementu dławiącego ( $Q_o=0$ ). Łączna liczba kombinacji pomiarów (zmian parametrów modelu) wynosiła 324. Pomiarów wykonywano po ustaleniu się warunków przepływu w modelu. Mierzono temperaturę ( $t$ ) wody na zasilaniu i na odpływie do zbiornika dolnego, natężenie dopływu wody do modelu ( $Q_d$ ), wydajność przelewu bocznego ( $Q$ ), odpływ wody z elementu dławiącego ( $Q_o$ ), a także ukształtowanie się zwierciadła w osi kanału dopływowego i w osi krawędzi przelewowej oraz różnicę ( $\Delta H$ ) położenia zwierciadła wody w komorze po elemencie dławiącym i w osi kanału, przed wlotem do elementu dławiącego.

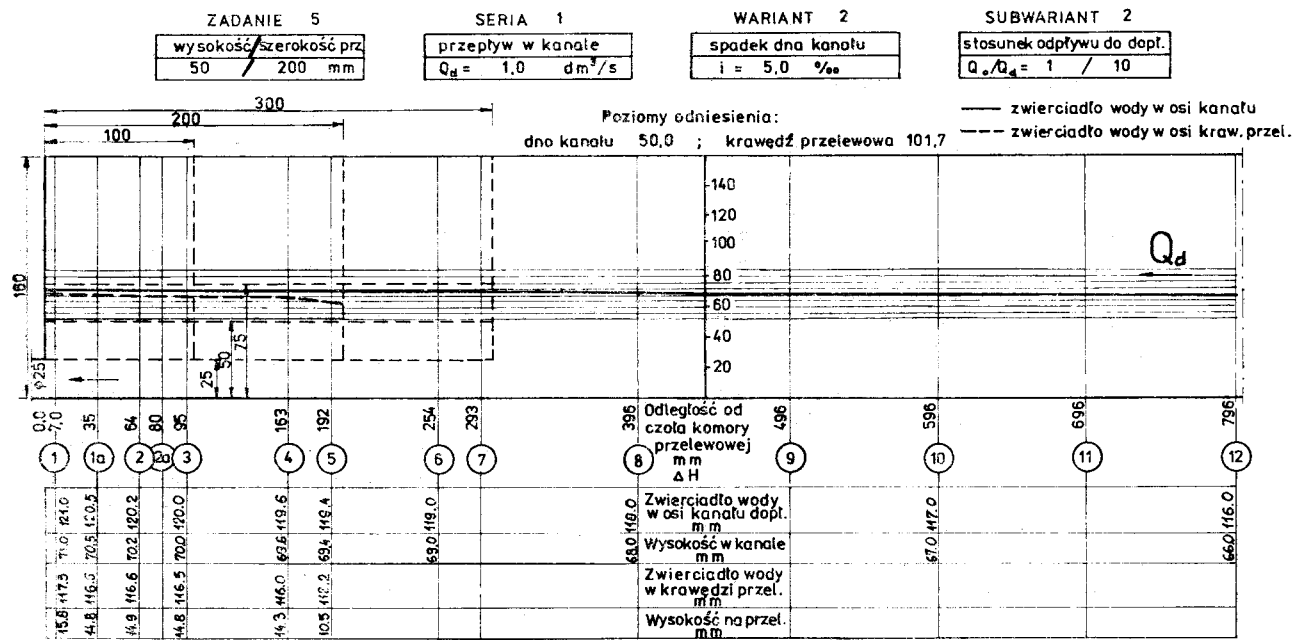
W celu zbadania ukształtowania się zwierciadła wody w osi kanału dopływowego i w osi krawędzi przelewowej przelewu bocznego, przy zamkniętym elemencie dławiącym, dokonywano przy każdej zmianie parametrów modelu pomiarów wysokości zwierciadła wody w kilku-nastu punktach rozmieszczonych na przelewie i w kanale dopływowym. Hydraulicznie przelewu

bocznego z regulowanym odpływem badano przy  $Q_o=1/15Q_d$ ,  $Q_o=1/10Q_d$ ,  $Q_o=1/5Q_d$  i  $Q_o=1/2,5Q_d$ . Wartości  $Q_o$  zmieniano dyskretnie w zakresie 0,067—0,600 dm<sup>3</sup>/s. Graficzną ilustrację uzyskanych wyników pomiarów przy  $Q_o/Q_d=1/10$  ( $Q_d=1,0$  dm<sup>3</sup>/s,  $l=200$  mm,  $p=51,7$  mm) przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

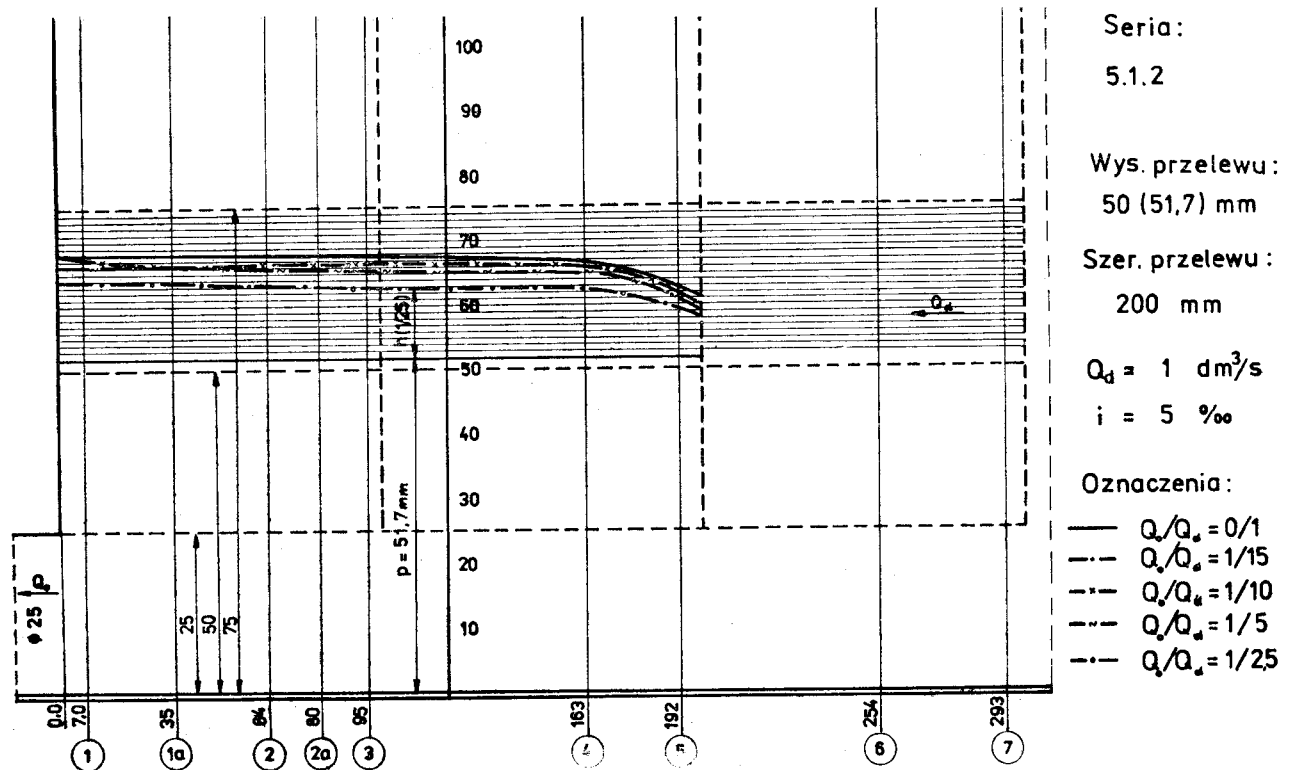
### Interpretacja wyników

Analiza materiału badawczego pozwoliła na stwierdzenie, że spadek dna kanału dopływo-

wego nie ma praktycznie wpływu na obraz pracy przelewu bocznego z regulowanym odpływem, niezależnie od wartości stosunku  $Q_o/Q_d$ , w tym również przy  $Q_o=0$ . Wysokości  $h_1$  warstwy przelewającej się wody przez koronę przelewową, a więc i wydajność  $Q$  przelewu przy określonej wartości  $Q_d$  są niemal identyczne przy spadkach  $i=1,5$  i  $10\text{‰}$  [3]. Zarówno w wypadku zamkniętego jak i czynnego elementu dławiącego, wysokość ( $p$ ) progu przelewu bocznego ma również zaniedbywalnie mały



Rys. 3 Położenie zwierciadła wody w osi kanału dopływowego i w osi krawędzi przelewowej

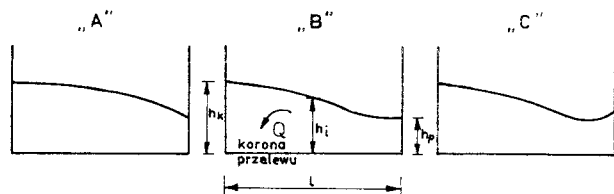


Rys. 4 Położenie zwierciadła wody w osi krawędzi przelewowej (skala 1:1/2)

wpływ na ukształtowanie zwierciadła wody w obrębie przelewu. Stwierdzono bowiem tylko nieznaczne różnice wysokości ( $h_i$ ) w osi krawędzi przelewowej, nawet przy 2- i 3-krotnym zwiększeniu wartości ( $p$ ). Np. dla  $l=200$  mm,  $Q_d=2,0$  dm<sup>3</sup>/s oraz  $Q_o=1/10$ ,  $Q_d=0,2$  dm<sup>3</sup>/s i zmianach wartości ( $p$ ) od 27,3 mm do 77,0 mm oraz zmianach spadku ( $i$ ) od 1,0 do 10‰, różnice wartości ( $h_i$ ) dochodzą co najwyżej do kilku procent [3]. Biorąc pod uwagę możliwość wystąpienia błędów w odczycie wartości ( $h_i$ ), różnice te są zanedbywalnie małe w porównaniu do zmiany wielkości ( $p$ ) i spadku ( $i$ ). Na tej podstawie, w tym etapie opracowywania wyników pomiarów pominięto wpływ ( $p$ ) oraz ( $i$ ) na działanie przelewu bocznego z regulowanym odpływem.

Przepływ  $Q_o$  przez element dławiący powoduje, że wydajność przelewu bocznego wynosi  $Q=Q_d-Q_o$  i jest zależna od wysokości  $h_i$  na krawędzi przelewowej. W każdej serii pomiarów wraz ze zmianą stosunku  $Q_o/Q_d$  od wartości 0/1 do 1/25 następowało w miarę równoległe przemieszczanie się w dół linii zwierciadła wody nad krawędzią przelewową (rys. 4).

Wyniki badań uzyskane przy spadku kanału dopływowego  $i=5‰$  uznano za reprezentatywne i poddano je dalszej analizie. Na tej podstawie dokonano podziału wyników pomiarów wysokości  $h_i$  w poszczególnych seriach ze względu na kształt położenia zwierciadła wody nad przelewem. I tak wyodrębniono 3 wzorce działania przelewu: A, B i C (rys. 5), różniące się zasadniczo kształtem linii zwierciadła wody.



Rys. 5 Wzorce działania przelewu bocznego

Wzorec A stanowi wyraźnie odrębną grupę w porównaniu do wzorców B i C. Ze względu na kształt linii zwierciadła wody na przelewie w przypadku wzorca A można wnioskować, że ruch wody w obrębie przelewu jest w tych warunkach spokojny. Charakter ruchu w wypadku wzorców B i C jest odmienny (przejsiowy i rwący), o czym świadczą odsunięcia i przegięcia krzywej położenia zwierciadła wody na przelewie — bez względu na jej długość ( $l$ ) i przepływ ( $Q$  i  $Q_o$ ).

W zjawiskach dynamicznych, do których należy zaliczyć działanie przelewów bocznych, układ podstawowy tworzą: długość, masa i czas. Równanie fizykalne do opisu hydrauliki przelewu bocznego zapisać można następująco [3, 6]:

$$F(q, g, h, l, Q)=0 \quad (3)$$

Funkcja bezwymiarowych iloczynów  $\pi$ , opisująca badane zjawisko przyjmuje postać:

$$f\left(\frac{Q}{g^{0,5}h^{2,5}}, -\frac{1}{h}\right)=0 \quad (4)$$

Po rozwikłaniu otrzymano ogólną zależność wydajności przelewu bocznego od pozostałych parametrów, w następującej postaci:

$$\frac{Q}{g^{0,5}h^{2,5}}=f_1(l/h) \quad (5)$$

stąd

$$Q=f_1(l/h) g^{0,5}h^{2,5} \quad (6)$$

Postać równania (5) jest przydatna do matematycznego opracowywania wyników badań modelowych. Równanie (6) sprowadzić można do postaci dogodnej do dalszych przekształceń, a mianowicie:

$$Q=f_1(l/h) h^2\sqrt{gh} \quad (7)$$

a po zbadaniu funkcji  $f_1$  do postaci:

$$Q=a_1(l/h)^{b_1} h^2\sqrt{gh} \quad (8)$$

przy czym przyjąć należy:  $a_1=2/3 \mu\sqrt{2}$ . Przy opracowywaniu wyników pomiarów przyjęto założenie, że wysokość ( $h$ ) warstwy wody na przelewie występująca we wzorach (5)–(8) równa jest wysokości ( $h_k$ ) na końcu przelewu. Zastosowane podstawienie:  $h=h_k$  ułatwia posługiwanie się w praktyce inżynierskiej formułą na ( $Q$ ) przy hydraulicznym obliczaniu przelewów burzowych z rurą dławiącą. Poszukiwaną zależność ilościowego opisu charakterystyki hydraulicznej przelewu bocznego z dławieniem odpływu sprowadzono do postaci:

$$y=a x^b \quad (9)$$

gdzie:  $y=Q/g^{0,5} h_k^{2,5}$ ;  $x=1/h_k$ .

Po obu stronnym zlogarytmowaniu równania (9) otrzymano:

$$\log y=\log a=b \log x \quad (10)$$

Przyjęto wstępnie odrębny liniowy opis zależności wg (10), przyporządkowując wyniki pomiarów i obliczeń poszczególnym wzorcom działania przelewu bocznego. W wyniku obliczeń numerycznych ustalono 3 równania prostych (metodą najmniejszych kwadratów w układzie podwójnie logarytmicznym) dla wzorców A, B i C przepływu na przelewie. Badano przy tym istotności korelacji liniowej poprzez określenie wartości współczynnika korelacji.

Dla wzorca przepływu A ustalono następującą postać szczegółową równania (9):

$$y=0,660 x^{1,008} \quad (11)$$

Współczynnik korelacji  $R_1=0,9906$ ; dla 50 stopni swobody korelacja została stwierdzona na poziomie  $\alpha=0,001$ . Równanie wyjściowe (8) przyjmuje więc postać:

$$Q=0,66 (1/h_k)^{1,01} h_k^2\sqrt{g h_k} \quad (12)$$

a po uporządkowaniu, zakładając, że  $2/3 \mu\sqrt{2}=0,66$ :

$$Q=2/3 \mu^{1,01} h_k^{0,99} \sqrt{2gh_k} \quad (13)$$

$$\text{przy czym } \mu=\frac{0,66 \cdot 3}{\sqrt{2} \cdot 2}=0,70.$$

Dla wzorca przepływu B ustalono następującą postać poszukiwanej funkcji  $f_1(l/h_k)$ :

$$y=0,677 x^{0,891} \quad (14)$$

Współczynnik korelacji  $R_2=0,9850$ ; dla 23 stopni swobody korelacja została stwierdzona na poziomie  $\alpha=0,001$ . Równanie (8) przyjmuje w tym przypadku postać:

$$Q=2/3 \mu^{10,89} h_k^{1,11} \sqrt{2gh_k} \quad (15)$$

przy czym  $\mu=0,72$ .

Dla wzorca przepływu C uszczegółowiono zależność (9) do postaci:

$$y=0,772 x^{0,695} \quad (16)$$

Współczynnik korelacji  $R_3=0,9560$ ; dla 13 stopni swobody korelacja została stwierdzona na poziomie  $\alpha=0,001$ . Stąd zapis (8) sprowadzić można do postaci:

$$Q=2/3 \mu^{10,70} h_k^{1,30} \sqrt{2gh_k} \quad (17)$$

przy czym  $\mu=0,82$ .

Należy zaznaczyć, że wyprowadzone wzory (13), (15) i (17) mają ograniczenia w stosowaniu, wynikające z zakresu uzyskanych zmian  $l/h_k$  w modelu, a mianowicie:

wzór (13):  $3,5 \leq l/h_k \leq 32,6$

wzór (15):  $2,1 \leq l/h_k \leq 12,6$

wzór (17):  $1,7 \leq l/h_k \leq 7,4$

Po zastosowaniu skal podobieństwa zjawisk, ograniczenia te przyjmują następujące wartości w warunkach naturalnych:

$b_k=1,5$  m

$0,4 \leq p \leq 1,2$  m

$1,5 \leq l \leq 4,5$  m

$0,5 \leq Q \leq 2,6$  m<sup>3</sup>/s

$1/15 \leq Q_o/Q_d \leq 1/2,5$

## Wnioski

1. Spośród parametrów geometrycznych przelewu bocznego najistotniejszy wpływ na jego wydajność ( $Q$ ) ma wysokość warstwy przelewającej się wody ( $h=h_k$ ), a w dalszej kolejności długość krawędzi przelewowej ( $l$ ) i współczynnik wydatku ( $\mu$ ).

2. Wprowadzenie do przelewu bocznego upustu wody z regulacją odpływu nie powoduje zakłóceń ruchu wody na przelewie, natomiast zmniejsza jego wydajność o wartości  $Q_o=Q_d-Q$ .

3. Na obraz pracy przelewu bocznego z dławieniem lub bez dławienia odpływu nie ma praktycznie wpływu spadek ( $i$ ) dna kanału dopływowego (przy równoległości krawędzi przelewowej do dna kanału).

Podobnie też wzniesienie krawędzi przelewowej ( $p$ ) ma zanedbywalnie mały (kilku-procentowy) wpływ na kształtowanie się i wysokość ( $h_k$ ) zwierciadła wody nad przelewem, w porównaniu do zakresu zmian wielkości ( $p$ ).  
4. Celowe i konieczne jest kontynuowanie badań zmierzających do stworzenia pełnych podstaw do projektowania kapitałoszczędnych przelewów bocznych z regulacją odpływu, w celu ich jak najszerszego rozpowszechnienia.

## LITERATURA

1. T. GRUSZECKI, J. WARTALSKI, A. WARTALSKI: Podstawy hydrauliczne obliczania przelewów burzowych z rurą dławiacą. Ochrona Środowiska, wyd. PZITS nr 434/1(18), Wrocław 1984.
2. G. J. KALLWASS: Drosselblenden am Regenüberlauf, GWF Wasser/Abwasser, Heft 6, 1968.
3. A. KOTOWSKI, E. WŁ. MIELCARZEWICZ: Hydrauliczna przelewów burzowych o regulowanym odpływie ścieków do oczyszczalni. Raporty Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., seria SPR nr 40/83, 53/84 i 30/85.
4. E. WŁ. MIELCARZEWICZ, J. WARTALSKI: Modyfikacja metod obliczania układów kanalizacyjnych i ich elementów. Raport Inst. Inż. Ochr. Środ. PWr., seria SPR nr 32/80.
5. A. WECHMANN: Hydraulik. Berlin 1955.
6. J. ZIEREP: Kryteria podobieństwa i zasady modelowania w mechanice płynów. PWN, Warszawa 1978.

## OZNACZENIA

$b_k$  — szerokość kanału, m

$g$  — przyspieszenie ziemskie, m/s<sup>2</sup>

$H_{kr}$  — wypełnienie krytyczne kanału, m

$h$  — wysokość warstwy wody nad krawędzią przelewową, m

$h_i$  — wysokość warstwy wody w osi krawędzi przelewu w punkcie  $i$ , m

$h_k$  — wysokość warstwy wody na końcu przelewu, m

$i$  — spadek dna kanału, ‰

$l$  — długość krawędzi przelewowej, m

$n$  — współczynnik szorstkości kanału,

$p$  — wzniesienie krawędzi przelewowej nad dnem kanału, m

$\rho$  — gęstość wody, g/m<sup>3</sup>

$\mu$  — współczynnik wydatku przelewu

$\xi_1$  — skala długości,  $\xi_1=l_N/l_M$

$Q$  — wydajność przelewu, m<sup>3</sup>/s

$Q_d$  — natężenie przepływu w kanale dopływowym, m<sup>3</sup>/s

$Q_o$  — wydajność rury dławiącej, m<sup>3</sup>/s

## A. Kotowski, E. W. Mielcarzewicz

### MODEL INVESTIGATIONS OF STORM OVERFLOW WITH CONTROLLED PASSAGE OF SEWAGE TO THE TREATMENT PLANT

The objective under testing is a 1:15 scale model of a storm overflow with lateral overfall edge and

throttle-controlled outflow of the sewage stream. It has been found that the bottom slope of the inlet channel and the position head of the overfall edge exert only a slight effect on the operation of the system, if at all. Empirical formulae describing the yield of the lateral overfall edge as a function of edge length and water layer depth are derived.