

Współczynnik wydatku przelewu szybowego w separatorze wirowym

Mgr inż. Marlena A. Gronowska, prof. dr hab. inż. Jerzy M. Sawicki
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

OMÓWIENIE PROBLEMU

Mianem przelewu szybowego określa się szczególny rodzaj urządzenia odprowadzającego ciecz, którego zasadniczym elementem jest pozioma krawędź przewodu odpływowego (rys. 1a) [1, 5]. Górna część tego przewodu bywa niekiedy rozszerzana. Nadaje się jej specyficznie kielichowy kształt, zbliżony do układu linii prądu strumienia odpływowego (rys. 1b). Zmniejsza to zaburzenia oraz zwiększa długość krawędzi przelewowej, dzięki czemu poprawia się hydrauliczna sprawność urządzenia, znajdując swój wyraz w jego anglojęzycznej nazwie *morning glory* (roślina pnąca z rodziny powojowatych).

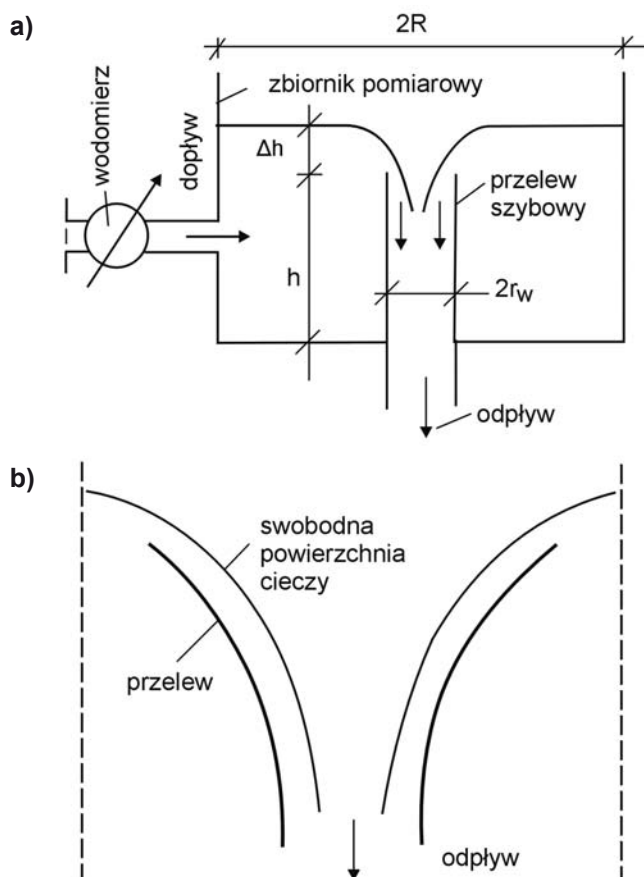
Przelewy takie od dawna używane są jako urządzenia upustowe w dużych zbiornikach wodnych i im podobnych obiektach hydrotechnicznych. W układach tego rodzaju mają one znaczne rozmiary i zapewniają odpływ strumieni cieczy o dużych natężeniach.

W ostatnich latach przelewy szybowe zaczęto stosować jako elementy odpływowe w separatorach wirowych. Są to stosunkowo niewielkie obiekty o kształcie walcowym (o średnicach i głębokościach rzędu 2 ÷ 3 metrów) służące do usuwania cząstek zawieszony unoszonej przez ciecz, w znacznym stopniu ana-

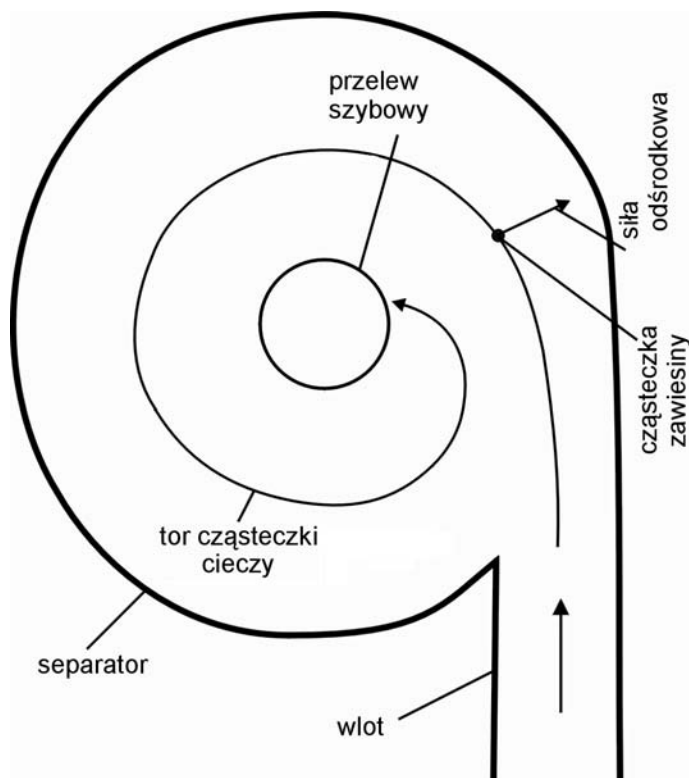
logiczne do cyklonów [7] stosowanych do odpylania gazów. Mają one charakter lokalnych urządzeń do oczyszczania ścieków, głównie deszczowych [3, 4]. Istotnym wyróżnikiem ich działania jest siła odśrodkowa wspomagająca separację zawiesziny. Siłę tę indukuje spiralny ruch cieczy wewnątrz separatora, uzyskiwany dzięki wprowadzeniu jej przewodem stycznym do ścianki i odprowadzeniu tej cieczy centralnie usytuowanym przewodem odpływowym, który działa jak przelew szybowy (rys. 2). Ukształtowanie pola przepływu w rejonie tego przelewu ma istotne znaczenie w pracy systemu, zarówno w niewielkich separatorach wirowych, jak i w wielkoskalowych obiektach hydrotechnicznych.

WYMIAROWANIE PRZELEWU SZYBOWEGO

Gdy przelew szybowy usytuowany jest w sposób osiowo-symetryczny (co ma miejsce w separatorach wirowych – rys. 2) albo w tak dużej odległości od brzegów obszaru, że ich wpływ na pole prędkości jest pomijalnie mały (jak to zwykle ma miejsce w przypadku budowli hydrotechnicznych), wtedy do opisu jego funkcjonowania można zastosować model jednowymiarowy, a konkretnie – równanie Bernoulliego [6]. Jest to klasyczne zadanie hydrauliki, związane z sukcesywnie następującą przemianą potencjalnej energii cieczy (wyrażoną poprzez jej spiętnienie nad krawędzią przelewu) w energię kinetyczną (ruch cieczy).



Rys. 1. Schemat ideowy stanowiska badawczego



Rys. 2. Zasada działania separatora wirowego

Występujący w trakcie przepływu ubytek energii mechanicznej, wynikający z lepkości płynu, opisuje się współczynnikiem straty lokalnej. W wyniku typowego przekształcenia równania Bernoulliego otrzymuje się następującą relację [8]:

$$Q = \frac{2}{3} \mu_p L \sqrt{2g\Delta h}^{3/2} \quad (1)$$

gdzie:

Q – wydatek przelewu,

μ_p – współczynnik wydatku,

g – przyspieszenie ziemskie,

h – spiętrzenie cieczy nad krawędzią przelewu, natomiast długość krawędzi przelewowej wyraża się oczywistą relacją:

$$L = 2\pi r_w \quad (2)$$

gdzie:

r_w – promień krzywizny krawędzi przelewowej.

WYZNACZENIE WSPÓLCZYNNIKA WYDATKU

Możliwość wykorzystania dogodnej relacji (1) jest warunkowana znajomością współczynnika wydatku. Niestety, w przelewach szybowych kwestia ta jest słabo rozpoznana w literaturze. Zapewne wynika to z faktu, że w przypadku dużych wymiarów takich obiektów możliwe jest pominięcie krzywizny krawędzi przelewowej i przyjęcie klasycznej wartości współczynnika [6, 8]:

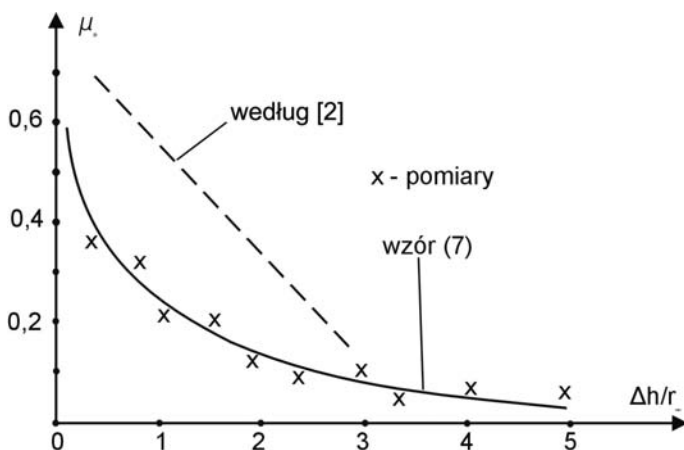
$$\mu_p = 0,63 \quad (3)$$

Bliższe informacje na ten temat można znaleźć w pracy [2], w której podano następujący zakres zmienności współczynnika wydatku, uzależnionego od ilorazu p spiętrzenia nad przelewem Δh oraz promienia krawędzi przelewowej r_w (rys. 3 – linia przerywana):

$$\text{dla } p = \Delta h / r_w = 0,2 \quad - \quad \mu_p = 1,36 \quad (4)$$

$$\text{dla } p = \Delta h / r_w = 2,0 \quad - \quad \mu_p = 0,36 \quad (5)$$

Analiza tych relacji budzi istotne wątpliwości. Jak już wspomniano, przy wzroście promienia krzywizny krawędzi przelewowej pojawia się możliwość pominięcia tego czynnika i przyjmowanie współczynnika jak dla krawędzi prostoliniowej, zgodnie



Rys. 3. Zmienność współczynnika wydatku przelewu szybowego

z relacją (3). Ponadto, ze względów fizykalnych nie można zaakceptować wartości współczynnika większej od jedności.

W tej sytuacji dla zakresu wartości odpowiadających separatorom wirowym przeprowadzono badania laboratoryjne. W tym celu w osi walcowego zbiornika otwartego umieszczono pionowy przewód odpływowy o promieniu $r_w = 15$ mm, zgodnie ze schematem na rys. 1a. Do zbiornika doprowadzano wodę, mierząc wodomierzem natężenie jej przepływu. Za pomocą szpilki wodowskazowej mierzono spiętrzenie nieobniżonego zwierciadła wody nad krawędzią przelewu Δh . W sumie wykonano pomiary dla dziesięciu różnych wydatków równomiernie pokrywających zakres działania stanowiska laboratoryjnego. Otrzymane wyniki wyrównano funkcją niewymierną postaci:

$$\mu_p = \frac{A}{(\Delta h / r_w)^a} \quad (6)$$

Posługując się metodą najmniejszych kwadratów wyznaczono stałe A oraz a , otrzymując następującą relację:

$$\mu_p = \frac{0,245}{(\Delta h / r_w)^{0,87}} \quad (7)$$

Przebieg tej funkcji pokazano na rys. 3 (linia ciągła), na tle układu punktów pomiarowych.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Od strony jakościowej przebieg otrzymanej zależności można ocenić pozytywnie. Choć przy malejących wartościach ilorazu p współczynnik wydatku według (7) zmierza asymptotycznie do nieskończoności, lecz jest to sytuacja albo technicznie nieistotna (bardzo mały wydatek dla przelewu o niedużym promieniu r_w), albo pozwalająca bez wątpliwości pominąć krzywiznę krawędzi przelewowej (orientacyjnie dla $p < 0,1$) i przyjąć współczynnik według zalecenia (3). Z kolei przy rosnącej wartości ilorazu p współczynnik asymptotycznie maleje do zera, co również nie stanowi problemu (przy bardzo dużych spiętrzeniach krawędź przelewu będzie całkowicie zalana i układ będzie pracował według innego schematu hydraulicznego, jak otwór).

W ujęciu ilościowym największy błąd względny występuje przy większych wartościach p i sięga 25%. Aby oszacować wpływ tego błędu na dokładność obliczeń projektowych separatorów wirowych zauważmy, że dla największych jednostek typoszeregów tych urządzeń, oferowanych przez producentów, natężenie przepływu ścieków jest rzędu 100 l/s. Promień przewodu odpływowego jest wtedy rzędu 0,20 m, zaś głębokość rzędu 1,00 m. W takim przypadku z relacji (1) i (7) otrzymujemy spiętrzenie nad krawędzią przelewową równe 0,33 m oraz współczynnik wydatku $\mu_p = 0,16$.

Przy podanym błędzie, obciążającym współczynnik wydatku, należy rozważyć zakres jego zmienności od 0,12 do 0,20. Wartościom tym odpowiadają spiętrzenia 0,37 m oraz 0,26 m. Przy wartości $h = 1,00$ m oznacza to, że błąd obliczenia całkowitego napełnienia separatora ($h + \Delta h$) nie przekracza 6%.

W tej sytuacji, biorąc też pod uwagę fakt, że w literaturze tego zagadnienia brak jest propozycji alternatywnych, zaakceptowano otrzymane wyniki.

LITERATURA

1. Budownictwo betonowe, tom XVII, Budowle wodne śródlądowe. Praca zbiorowa pod red. W. Balcerskiego, Arkady, Warszawa 1969.
2. Camargo S. A., Doelling O. R., Varas E. A.: Mathematical model of morning glory spillways, using artificial neural network. Proc. Int. Symp. on Hydraulic Structures, Ciudad Guajama (Venezuela), październik 2006.
3. Gronowska M. A., Sawicki J. M.: Study of rotational separators operation and design. [W:] Technical Progress in Sanitary Engineering, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
4. Królikowska J.: Urządzenia inżynierskie z ruchem wirowym, stosowane na sieci kanalizacyjnej. Inżynieria Ekologiczna, nr 26/2011.
5. Nalluri C., Featherstone R. F.: Civil Engineering Hydraulics. Wiley-Blackwell, New Delhi 2001.
6. Puzyrewski R., Sawicki J. M.: Podstawy mechaniki płynów i hydrauliki. Wyd. 4, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.
7. Rhodes M.: Introduction to Particle Technology. John Wiley and Sons Ltd., New York 2008.
8. Sawicki J. M., Przepływy ze swobodną powierzchnią. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.