

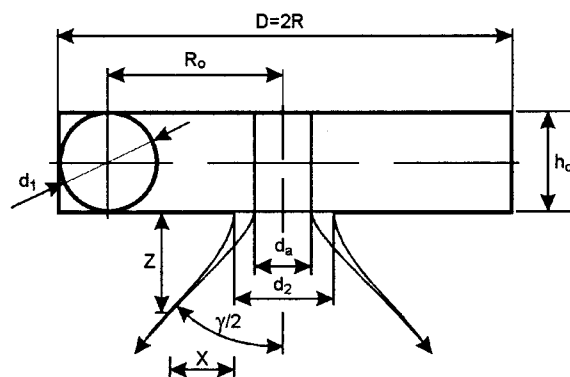
Patryk Wójtowicz, Andrzej Kotowski

## Badania modelowe cylindrycznych regulatorów hydrodynamicznych

Regulatory przepływu są stosowane wszędzie tam, gdzie występuje potrzeba kontroli strumienia objętości cieczy. Tradycyjne urządzenia dławiące, jak kryzy, zwężki czy zasuwy, umożliwiają ograniczenie tego strumienia poprzez zmniejszenie czynnego przekroju regulatora. W rezultacie jednak powodować to może jego zatykanie, szczególnie w przypadku cieczy zanieczyszczonych. Ponadto ruchome części mechaniczne zmniejszają niezawodność działania takich urządzeń. Wad tych pozbawione są regulatory wirowe.

Pierwowzorem urządzeń wirowych był opatentowany przez Thoma [1] tzw. zawór zwrotny (niem. Rückstrombremse). Urządzenie to – zasilane przez króciec wlotowy, styczny do cylindrycznej komory wirowej – powodowało znaczny opór hydrauliczny, a gdy przepływ odbywał się w przeciwnym kierunku (zasilanie przez osiowy otwór w dnie cylindra) opór przepływu był niewielki. Ze względu na swoje właściwości było ono początkowo wykorzystywane jako zawór zwrotny w systemach ciśnieniowych. Ze względu na analogię działania do diody nazywane jest także w literaturze diodą wirową (ang. vortex diode, niem. Wirbelkammerdiode). Pierwotna konstrukcja urządzenia stała się obiektem badań podjętych w pracach [2,3], które zmierzały do optymalizacji parametrów geometrycznych urządzenia tak, aby uzyskać jak najlepszą sprawność hydrauliczną, tzn. jak największą wartość stosunku oporów przepływu dławionego do przepływu swobodnego. Urządzenia takie stosowane są m.in. na kanałach obojętnych w elektrowniach [4,5]. Znajdują również zastosowanie do tłumienia wahań zwierciadła wody w zamknięciach wodnych oraz przed zbiornikami wodno-powietrznymi, w zastosowaniu do tłumienia uderzeń hydraulicznych [6,7]. Diody wirowe z powodzeniem udało się zastosować w technice mikroprzepływów, jako element składowy mikropomp [8]. Gdy urządzenie wirowe zasilane jest tylko z jednej strony i działa wyłącznie dławiąco, nazywane jest regulatorem przepływu, ale też dławikiem bądź zaworem wirowym (niem. Wirbeldrossel) [9]. Cechuje je prosta budowa, niezawodność działania oraz wysoka skuteczność dławienia przepływu cieczy. Współczynnik oporu miejscowego może osiągać wartość  $\zeta=370$  [10].

W przykładowym regulatorem wirowym cylindrycznym (rys. 1) ciecz dopływa do urządzenia przez króciec styczny do tworzącej cylindra, dzięki czemu nadawany jest jej ruch wirowy, który utrzymuje się na całej szerokości komory, aż do otworu wylotowego w dnie cylindra. W ruchu tym prędkość obwodowa cieczy zwiększa się wraz ze zbliżaniem się do osi cylindra, a dzięki sile odśrodkowej w komorze wirowej



Rys. 1. Schemat cylindrycznego regulatora wirowego

ciśnienie maleje w kierunku jej osi, aby na powierzchni rdzenia powietrznego osiągnąć ciśnienie otoczenia. Wytwarzający się rdzeń powietrzny ma istotny wpływ na skuteczność dławiącego działania urządzenia. Rozpylana ciecz, tworzy na odpływie stożek o kącie rozwarcia  $\gamma$ .

Regulatory wirowe są stosowane w budownictwie wodnym jako urządzenia do rozpraszania energii w upustach dennych [11]. Komora wirowa wykorzystywana jest także jako urządzenie zawirowujące wstępnie strumień cieczy dopływający do pomp ściekowych, co pozwala zmniejszyć ich moc [5]. W systemach wodociagowych i kanalizacyjnych służą głównie do dławienia przepływu cieczy w obiektach do oczyszczania wody i ścieków [12].

### Cel i zakres badań

Pomimo znacznej liczby prac, głównie z dziedziny automatyki strumieniowej, dotyczących wzmacniaczy przepływu (tzw. triody) czy też diody wirowej, w literaturze dostępne są tylko nieliczne badania regulatorów wirowych wykorzystywanych w inżynierii środowiska do dławienia przepływu wody lub ścieków (np. z przelewów burzowych, separatorów czy zbiorników retencyjnych), a samo urządzenie traktowane jest nadal jako tzw. czarna skrzynka. Dotychczasowy, analityczny, opis działania regulatorów wirowych sprowadza się praktycznie do wzoru Torriciellego, w którym współczynnik przepływu ( $\mu$ ) wyznaczany jest doświadczalnie, osobno w przypadku każdego regulatora. Brak jawnych charakterystyk hydraulicznych, określających związek ilościowy i jakościowy parametrów geometrycznych oraz eksploatacyjnych z dławianym działaniem urządzenia, mierzonych np. współczynnikiem oporów miejscowych ( $\zeta$ ), czy też współczynnikiem przepływu ( $\mu$ ), uniemożliwia ocenę wiarygodności działania takich urządzeń, zwłaszcza o dużych gabarytach.

W pracy podjęto badania modelowe cylindrycznych regulatorów wirowych w skali półtechnicznej, mające na celu określenie wpływu parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych na ich sprawność dławienia przepływu. W wyniku przeprowadzonych badań ustalono wzory empiryczne uzależniające wartość współczynnika przepływu ( $\mu$ ) od wymiarów konstrukcyjnych samych urządzeń, a także od średnicy rdzenia powietrznego ( $d_a$ ) oraz kąta rozpylania cieczy ( $\gamma$ ), do racjonalnego ich projektowania i stosowania. Badania takie – odnoszące się do regulatorów wirowych – nie mają odpowiednika w literaturze przedmiotu.

Modele regulatorów zostały zmontowane z elementów składowych tak, aby można było uzyskać zmiany ich parametrów geometrycznych w szerokim zakresie. Poszczególne elementy wykonano z metapleksu i łączono je za pomocą połączeń kołnierзовych, uszczelnianych za pomocą pierścieni typu o-ring. Zmieniano takie parametry, jak średnica króćca wlotowego ( $d_1$ ) i średnica otworu wylotowego ( $d_2$ ) oraz wysokość komory wirowej ( $h_c$ ). Średnica wewnętrzna komory wirowej wynosiła  $D=290$  mm, a grubość krawędzi otworu odpływowego  $s=10$  mm. W tabeli 1 podano wymiary badanych konstrukcji regulatorów wraz z ustalonymi doświadczalnymi wartościami współczynników  $\mu$  i  $\zeta$ .

W 19. seriach przebadano urządzenia o wysokościach komory wirowej ( $h_c$ ) w przedziale 62+312 mm, przy średnicach króćca wlotowego ( $d_1$ ) równych 30 mm, 50 mm i 80 mm. Przy danej średnicy króćca wlotowego ( $d_1$ ) przyjęto średnice otworu wylotowego ( $d_2$ ) równe 30 mm, 50 mm i 80 mm. Przy wartości naporu  $\Delta H=2,5$  mH<sub>2</sub>O minimalna przepustowość regulatora wirowego o  $d_1=d_2=30$  mm i  $h_c=62$  mm wyniosła  $q_v=0,8$  dm<sup>3</sup>/s (seria 1), natomiast maksymalna przepustowość regulatora o  $d_1=d_2=80$  mm i  $h_c=312$  mm wyniosła  $q_v=7,9$  dm<sup>3</sup>/s (seria 18).

## Stanowisko doświadczalne

Stanowisko doświadczalne składało się z dwóch układów: badawczego i zasilającego (rys. 2). Układ badawczy składał się z komory dopływowej (1), komory odpływowej (2) oraz przelewu mierniczego (3). Układ zasilający składał się ze zbiornika dolnego (4), pompy obiegowej (5) i zbiornika górnego (6) z przelewem wyrównawczym (7). Dopływ wody do układu badawczego był regulowany zaworem kulowym (8), umieszczonym przed komorą zasilającą (9), połączoną z komorą dopływową (1). W skład stanowiska wchodziły ponadto przelew teleskopowy (10), przegroda żaluzjowa (11), badany regulator (12), tablica piezometrów (13) oraz przetworniki ciśnienia (14).

Wzorcowanie przelewu mierniczego (o kącie 90°) wykonano metodą objętościową, natomiast cyfrowe przetworniki ciśnienia wzorcowane były za pomocą piezometrów. Średnicę rdzenia powietrznego ( $d_a$ ) oraz kąt rozpylania cieczy ( $\gamma$ ) zmierzono metodą fotograficzną, z wykorzystaniem aparatu cyfrowego oraz programu Autocad 2004. Badania wybranych regulatorów obejmowały pomiary rozkładu ciśnienia za pomocą przetworników oraz określenie profili prędkości miejscowej wewnątrz komory wirowej za pomocą anemometru laserowego – LDA [10].

## Dyskusja wyników badań

### Analiza wymiarowa zjawiska

Strata ciśnienia ( $\Delta p$ ) w urządzeniu wirowym zależy od następujących zmiennych wymiarowych: gęstości cieczy ( $\rho$ ), dynamicznego współczynnika lepkości wody ( $\mu_w$ ), przyspieszenia ziemskiego ( $g$ ), strumienia objętości ( $q_v$ ), promienia komory wirowej ( $R=D/2$ ), promienia zawirowania cieczy na wlocie ( $R_o=R-r_1$ ), promienia otworu wylotowego ( $r_2$ ), wysokości komory wirowej ( $h_c$ ), grubości krawędzi otworu wylotowego ( $s$ ) oraz chropowatości ścianek regulatora ( $k$ ). W wyniku zastosowania analizy wymiarowej otrzymano wzór na straty ciśnienia w postaci:

$$\Delta p = \zeta \frac{q_v^2 \rho}{2A_1^2} \quad (1)$$

w której  $\zeta$  jest współczynnikiem oporu, będącym funkcją następujących bezwymiarowych liczb podobieństwa oraz parametrów:

$$\zeta = \zeta \left( Re, Fr, \frac{R}{r_1}, \frac{R_o}{r_1}, \frac{r_2}{r_1}, \frac{h_c}{r_1}, \frac{s}{r_1}, \frac{k}{r_1} \right) \quad (2)$$

w której:

$Re$  – liczba Reynoldsa ( $Re=2\rho q_v/\pi\mu_w r_1$ )

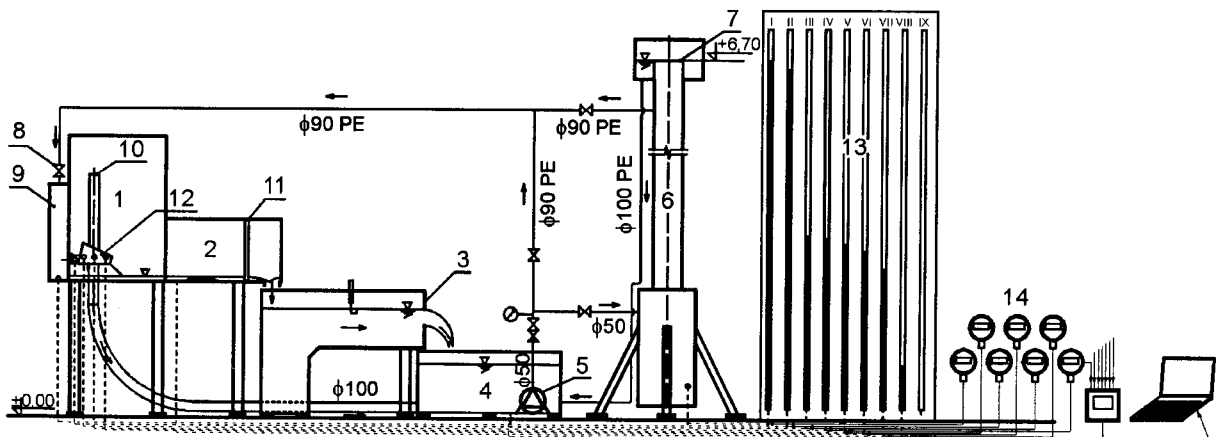
$Fr$  – liczba Froude'a ( $Fr=q_v^2/2g\pi^2 r_1^3$ )

Po obustronnym podzieleniu wyrażenia (1) przez  $\rho g$  otrzymano wzór na wysokość ( $\Delta H$ ) strat ciśnienia:

$$\Delta p = \zeta \frac{q_v^2}{2gA_1^2} \quad (3)$$

a stąd:

$$q_v = \frac{1}{\sqrt{\zeta}} A_1 \sqrt{2g\Delta H} \quad (4)$$



Rys. 2. Schemat stanowiska doświadczalnego

Tabela 1. Wymiary i parametry dławienia regulatorów wirowych w poszczególnych seriach badawczych

| Nr serii | d <sub>1</sub> mm | d <sub>2</sub> mm | h <sub>c</sub> mm | μ      | ζ     | d <sub>a</sub> mm | γ stp. |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|-------|-------------------|--------|
| 1        | 30                | 30                | 62                | 0,160  | 39,1  | 20                | 90     |
| 2        | 30                | 50                | 62                | 0,258  | 15,0  | 38                | 104    |
| 3        | 30                | 80                | 62                | 0,373  | 7,2   | 66                | 113    |
| 4        | 50                | 30                | 82                | 0,0847 | 139,4 | 16                | 85     |
| 5        | 50                | 50                | 82                | 0,155  | 41,6  | 34                | 98     |
| 6        | 50                | 80                | 82                | 0,251  | 15,9  | 60                | 111    |
| 7        | 80                | 30                | 112               | 0,0521 | 368,4 | 13                | 74     |
| 8        | 80                | 50                | 112               | 0,102  | 96,1  | 29                | 95     |
| 9        | 80                | 80                | 112               | 0,186  | 28,9  | 56                | 102    |
| 10       | 30                | 30                | 262               | 0,193  | 26,9  | 18                | 82     |
| 11       | 30                | 50                | 262               | 0,315  | 10,1  | 36                | 99     |
| 12       | 30                | 80                | 262               | 0,455  | 4,8   | 65                | 110    |
| 13       | 50                | 30                | 282               | 0,104  | 92,5  | 15                | 77     |
| 14       | 50                | 50                | 282               | 0,190  | 27,7  | 33                | 89     |
| 15       | 50                | 80                | 282               | 0,307  | 10,6  | 59                | 105    |
| 16       | 80                | 30                | 312               | 0,0610 | 268,7 | 12                | 68     |
| 17       | 80                | 50                | 312               | 0,124  | 65,0  | 28                | 83     |
| 18       | 80                | 80                | 312               | 0,223  | 20,1  | 55                | 100    |
| 19       | 30                | 30                | 174               | 0,180  | 30,9  | 19                | 86     |

albo wobec  $1/\sqrt{\zeta}=\mu$ :

$$q_v = \mu A_1 \sqrt{2g\Delta H} \quad (5)$$

Zapis (5) określa się w literaturze jako wzór Torricellego, w którym  $\mu$  jest współczynnikiem przepływu (funkcją analogiczną do postaci (2)), obliczanym ze wzoru:

$$\mu = \frac{q_v}{A_1 \sqrt{2g\Delta H}} \quad (6)$$

Takie podejście do zagadnienia jest, jak dotychczas, powszechnie stosowane do opisu ilościowego działania regulatorów wirowych, a wartość współczynnika  $\mu$ , obliczana ze wzoru (6), służy głównie do porównania skuteczności dławienia przepływu z klasycznymi urządzeniami dławiącymi [4,5,13,14].

Wartość współczynnika przepływu zależy od momentu pędu – im jest on większy tym mniejsza jest wartość współczynnika  $\mu$ , a większy opór hydrauliczny  $\zeta$  urządzenia. Strugi cieczy dopływające stycznymi króćcami wlotowymi zderzają się z warstwą cieczy wirującej już wewnątrz komory. Kąt natarcia ( $\vartheta$ ) strugi dopływowej definiowany jest zależnością [15]:

$$\cos\vartheta = \frac{R_o - r_1}{R_o + r_1} = \left( \frac{\frac{R_o}{r_1} - 1}{\frac{R_o}{r_1} + 1} \right) \quad (7)$$

Kąt  $\vartheta$  jest zatem funkcją parametru  $R_o/r_1$ . Wskutek zderzenia dwóch strug następuje wężenie strugi głównej (wpływającej do regulatora), przy jednoczesnym zwiększeniu promienia zawirowania ( $R_o$ ). Prowadzi to więc do zmniejszenia wartości współczynnika  $\mu$ , czyli do zwiększenia oporu ( $\zeta$ ) urządzenia [16].

Uwzględniając że pęd na promieniu zawirowania ( $R_o$ ), na wejściu do komory wirowej regulatora, wywołuje ruch wirowy, w którym dominująca prędkość obwodowa zależy od pola powierzchni króćca wlotowego ( $r_1^2$ ), a z kolei siła odśrodkowa w ruchu wirowym jest odwrotnie proporcjonalna do trzeciej potęgi promienia otworu wylotowego ( $r_2^3$ ), wprowadzono do funkcji (2) kombinację iloczynów potęgowych wymiarów liniowych:

$$K = \frac{R_o}{r_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^2 = \frac{R_o r_1^2}{r_2^3} \quad (8)$$

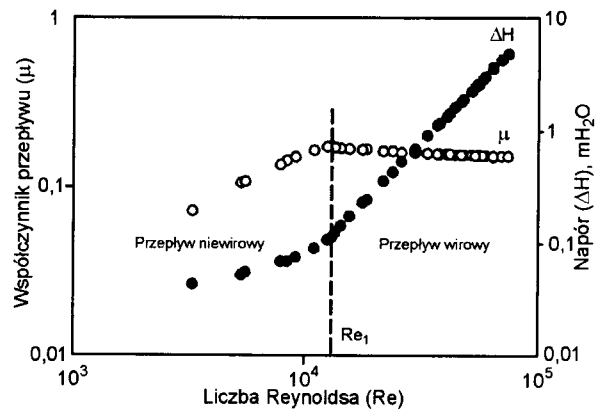
jako stałą geometryczną ( $K$ ) badanych regulatorów wirowych. Wówczas funkcja współczynnika  $\mu$  (analogicznie do  $\zeta$ ) przyjmuje ostatecznie postać:

$$\mu = \mu \left( Re, Fr, K, \frac{R}{r_1}, \frac{R_o}{r_1}, \frac{r_2}{r_1}, \frac{h_c}{r_1}, \frac{s}{r_1}, \frac{k}{r_1} \right) \quad (9)$$

Istotność wpływu bezwymiarowych parametrów i liczb podobieństwa na wartość współczynnika  $\mu$  (bądź analogicznie współczynnika  $\zeta$ ) została zbadana doświadczalnie.

### Swobodny i wirowy przepływ w regulatorach hydrodynamicznych

W regulatorach hydrodynamicznych wyróżnić można dwa rodzaje przepływów, tj. swobodny (bezwirowy) oraz wirowy. Wraz ze wzrostem wartości liczby Reynoldsa wartość współczynnika przepływu ( $\mu$ ) rośnie, osiągając wartość maksymalną w momencie przejścia ruchu swobodnego w wirowy. Wyrażna granica ( $Re_1$ ) pomiędzy ruchem swobodnym i wirowym widoczna jest po przedstawieniu zależności współczynnika  $\mu$  od liczby  $Re$  (przy uwzględnieniu wysokości ciśnienia  $\Delta H$  w skali logarytmicznej – rys. 3).

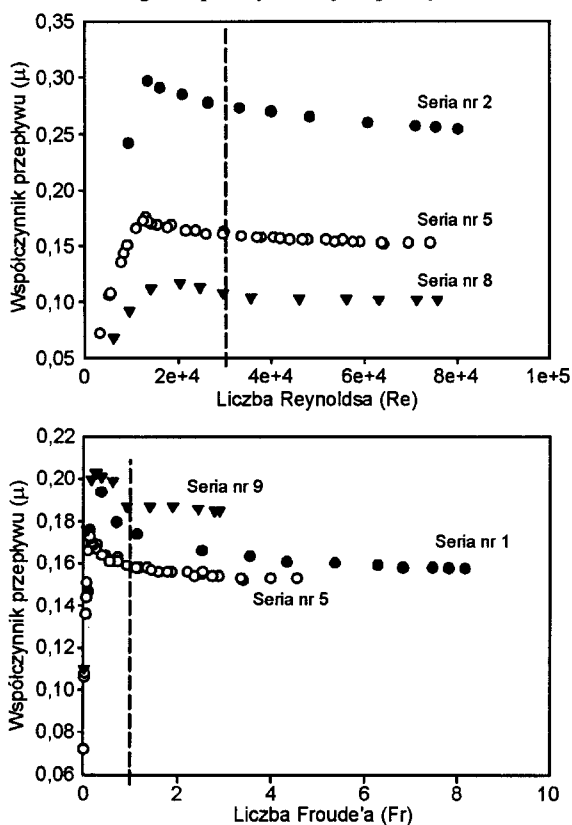


Rys. 3. Zależność współczynnika  $\mu$  od liczby  $Re$  przy naporze  $\Delta H$  (seria 5)

Przejęcie pomiędzy ruchami odpowiada bardzo małej wysokości naporu ( $\Delta H \approx 0,1$  m), nieznacznie większej od wysokości komory wirowej ( $h_c$ ). W dalszych rozważaniach pominięto obszar ruchu swobodnego, jako nieistotny z praktycznego punktu widzenia dławienia przepływu cieczy w regulatorach hydrodynamicznych.

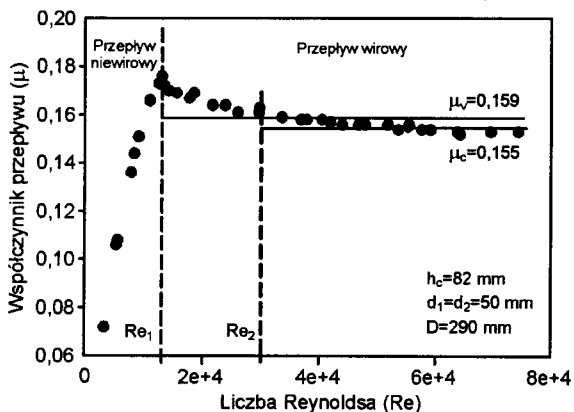
#### Wpływ liczb Reynoldsa i Froude'a na współczynnik $\mu$

Zależność współczynnika  $\mu$  od liczb  $Re$  i  $Fr$  zilustrowano na wykresach (rys. 4), z których wynika że w ruchu wirowym jego wartość maleje nieznacznie wraz ze wzrostem wartości zarówno liczby  $Re$ , jak i  $Fr$ . Przy wartościach  $Re > 30$  tys. oraz  $Fr > 1$  wartość tego współczynnika jest praktycznie stała.



Rys. 4. Zależność współczynnika  $\mu$  od liczby  $Re$  i liczby  $Fr$

Z analizy zależności współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa (rys. 5) w szczególności wynika, że w dolnym zakresie ruchu wirowego ( $Re_1 + Re_2$ ) jego wartość w niewielkim stopniu zależy od  $Re$ . Ponieważ badania wykonano na



Rys. 5. Interpretacja wartości współczynników przepływu  $\mu_v$  i  $\mu_c$  powyżej granicznych wartości liczby Reynoldsa  $Re_1$  i  $Re_2$  (seria 5,  $d_1=d_2=50$  mm)

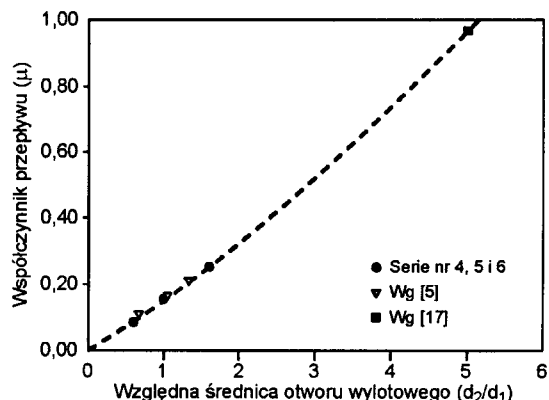
poniższych modelach obiektów rzeczywistych, praktyczne znaczenie do oceny wartości  $\mu$  mają wyniki pomiarów osiągnięte przy  $Re > Re_2$ , gdzie  $\mu$  jest praktycznie stała. Średnią wartość współczynnika przepływu, obliczoną z całego zakresu ruchu wirowego ( $\mu_v$ ), tj. powyżej granicznej wartości liczby  $Re_1$ , porównano ze średnią wartością ( $\mu_c$ ), obliczoną z zakresu powyżej granicznej wartości liczby  $Re_2$ . Średnie te różniły się przeciętnie o 1,6% (maksymalnie o 3,8%), co pozwala przyjąć  $\mu_c$  do interpretacji wyników badań [10].

#### Wpływ parametrów geometrycznych na współczynnik $\mu$

Poza liczbami podobieństwa  $Re$  i  $Fr$  analizowano wpływ parametrów konstrukcyjnych regulatorów cylindrycznych na wartość współczynnika przepływu. Analizie poddano bezwymiarowe stosunki  $d_2/d_1$ ,  $h_c/d_1$ ,  $D/d_1$ ,  $R_o/d_1$  i  $K$ , eliminując  $k/d_1$  oraz  $s/d_1$ .

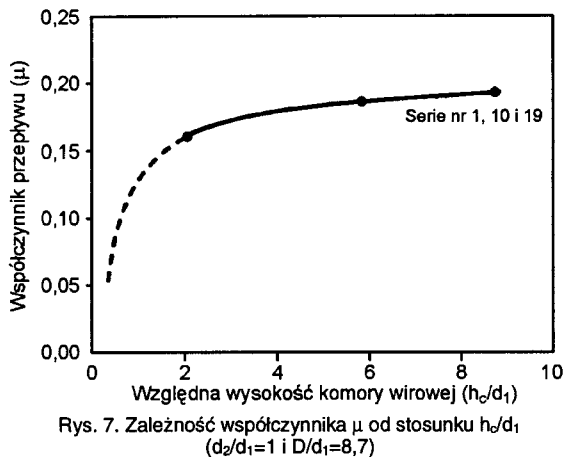
W pracach [3,5] wykazano, że chropowatość ( $k$ ) ścian regulatora wirowego ma pewien wpływ na wartość współczynnika przepływu, przy czym zwiększenie chropowatości powoduje zmniejszenie oporów przepływu, co jest sprzeczne z celem stawianym tym urządzeniom, tj. maksymalizacją oporu przepływu. Modele regulatorów wykonano więc w skali półtechnicznej z najgładszych materiałów (metapleks) o chropowatości zbliżonej do chropowatości technicznych regulatorów wykonanych ze stali nierdzewnej. Grubość ( $s$ ) krawędzi otworu odpływowego wszystkich badanych regulatorów cylindrycznych wynosiła 10 mm, co jest zbliżone do warunków rzeczywistych. W wybranych seriach przetestowano wpływ  $s=1$  mm na wartość współczynnika  $\mu$ , wykazując różnice w granicach błędów pomiarów. Przykładowo, przy  $s=1$ ,  $d_1=d_2=50$  mm i  $h_c=82$  mm –  $\mu=0,154$  (por. tab. 1, poz. 5).

Z rysunku 6 wynika, że wraz ze wzrostem stosunku  $d_2/d_1$  wartość współczynnika przepływu wzrastała, a tym samym zmniejszał się opór hydrauliczny urządzenia ( $\zeta$ ). Na wykres naniesiono wyniki uzyskane w przypadku ciśnieniowego zaworu wirowego przy przepływie dławiącym o  $D/d_1=5$  (tj. o średnicy komory  $D=75$  mm i  $d_1=15$  mm) i przy stosunkach  $d_2/d_1=0,67$ , 1,0 i 1,33 [5] oraz w przypadku cyklonów ( $D=d_2$ ) przy  $d_2/d_1=5,0$ , gdy uzyskano ekstremalną wartość  $\mu=0,967$  [17].



Rys. 6. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $d_2/d_1$  ( $D/d_1=5,8$  i  $h_c/d_1=1,64$ )

Na rysunku 7 zilustrowano zależność współczynnika  $\mu$  od względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$ ) w przypadku regulatorów cylindrycznych badanych w 1., 10. i 19. serii badań ( $h_c/d_1=2,1$  mm, 5,8 mm i 8,7 mm,  $d_1=d_2=30$  mm). Z wykresu przedstawionego na rysunku 7 wynika, że – podobnie jak w przypadku wpływu stosunku  $d_2/d_1$  na zwiększenie wartości  $\mu$  – również wraz ze wzrostem względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$ ) zwiększa się wartość współczynnika  $\mu$ .

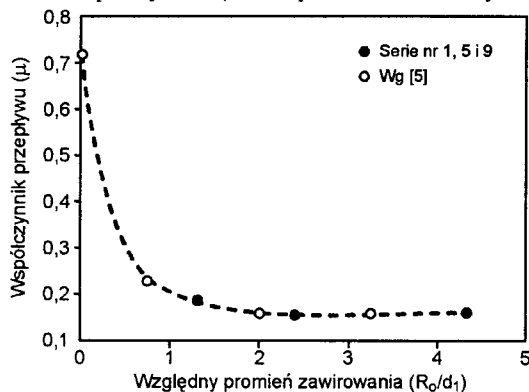


Rys. 7. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $h_c/d_1$  ( $d_2/d_1=1$  i  $D/d_1=8,7$ )

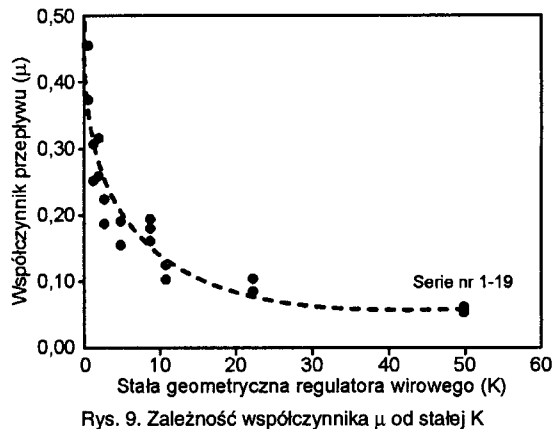
Oznacza to, że przy zwiększającej się wysokości komory wirowej ( $h_c$ ) (przy stałych pozostałych parametrach geometrycznych) opór hydrauliczny ( $\zeta$ ) urządzenia maleje. Wpływ warstwy przyściennej na rozkład prędkości i ciśnienia w przypadku płaskich komór wirowych ( $h_c/R \ll 1$ ) jest więc znaczny [18]. Ze względu na skuteczność dławienia, racjonalne jest stosowanie możliwie małych wysokości ( $h_c$ ) komór wirowych.

Na rysunku 8 przedstawiono zależność współczynnika przepływu ( $\mu$ ) od względnego promienia zawirowania ( $R_o/d_1$ ). W pracy [5] w przypadku urządzenia wirowego w postaci kolana  $90^\circ$  z dopływem  $d_1=15$  mm i odpływem  $d_2=D=15,5$  mm, przy którym  $R_o/d_1=0,02$ , uzyskano wartość  $\mu=0,718$ . Wynika stąd, że w przypadku bardzo małych wartości względnego promienia zawirowania ( $R_o/d_1$ ) współczynnik przepływu osiągać może ekstremalnie duże wartości. Wraz ze wzrostem wartości  $R_o/d_1$ , przenoszącym moment pędu dopływającej cieczy, wartość współczynnika przepływu początkowo maleje, czyli wzrasta opór urządzenia (rys. 8). W badanym przedziale zmienności  $R_o/d_1$ , zawierającym się w granicach od 1,31 do 4,33, współczynnik  $\mu$  osiągał wartość w przybliżeniu stałą, zwłaszcza przy  $R_o/d_1 > 1,5$ . Należy wnioskować, że w wyniku dalszego zwiększania promienia  $R_o$ , a więc i średnicy komory wirowej ( $D$ ) względem średnicy króćca wlotowego ( $d_1$ ), zwiększa się powierzchnia styku wirującej cieczy ze ścianami i rosną opory ruchu. Ponieważ przyrost pędu równoważony jest wówczas siłami tarcia, nieracjonalne jest zatem projektowanie takich regulatorów przy stosunku  $R_o/d_1 > 1,5$  (bądź odpowiednio  $D/d_1 > 4$ , gdyż  $D=2R_o+d_1$ ).

Stała regulatora ( $K$ ) grupuje w sobie takie parametry geometryczne regulatorów wirowych, jak  $d_1$ ,  $d_2$  i  $R_o$  (8). Wykres zależności współczynnika  $\mu$  od  $K$  przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 8. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $R_o/d_1$  ( $d_2/d_1=1$ )



Rys. 9. Zależność współczynnika  $\mu$  od stałej  $K$

Z przebiegu tej zależności wynika, że wraz ze wzrostem wartości  $K$  zmniejsza się wartość  $\mu$ , czyli zwiększa się opór hydrauliczny ( $\zeta$ ) stawiany przez regulator. Przy stałej wartości  $K$  dana para wartości  $\mu$  odpowiada zmianie wysokości komory ( $h_c$ ), czyli wraz ze wzrostem  $h_c$  zwiększa się wartość  $\mu$  przy danej wartości  $K$ .

Z analizy przedstawionych graficznie zależności współczynnika  $\mu$  od poszczególnych parametrów bezwymiarowych, tj.  $d_2/d_1$ ,  $h_c/d_1$ ,  $D/d_1$ ,  $R_o/d_1$  oraz  $K$ , wynika, że parametry te mogą być aproksymowane za pomocą funkcji potęgowej w postaci  $y=a_0x^{a_1}$ . W przypadku badanych regulatorów cylindrycznych, do opisu zależności współczynnika przepływu od bezwymiarowych liczb podobieństwa przyjęto wstępnie złożony model potęgowy. W celu określenia istotności wpływu zmiennych niezależnych na wartość współczynnika  $\mu$  przeprowadzono statystyczną analizę wyników badań. Za pomocą regresji wielokrotnej, metodą najmniejszych kwadratów (dane z 19 serii pomiarowych), uzyskano następującą zależność:

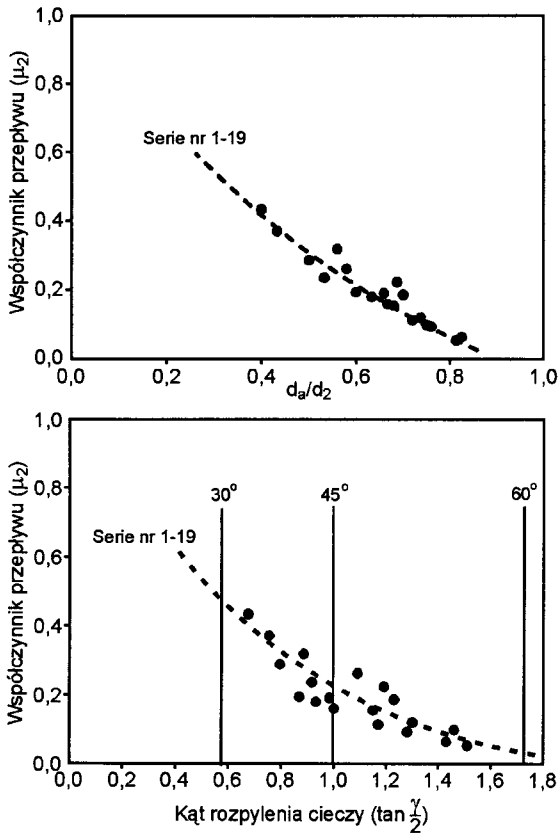
$$\mu = 0,066d_2/d_1 + 0,0089h_c/d_1 + 0,362K^{-0,135} - 0,211 \quad (10)$$

przy  $R^2=0,922$  oraz średnim błędzie kwadratowym równym 7,3%.

Istotny statystycznie okazał się więc wpływ parametrów  $d_2/d_1$ ,  $h_c/d_1$  oraz  $K$  na wartość współczynnika  $\mu$ . Stała regulatora wirowego ( $K$ ), ujmująca łączny wpływ  $d_2/d_1$  i  $R_o/d_1$ , zwiększa dokładność ilościowego opisu zjawiska i pozwala ograniczyć liczbę zmiennych bez istotnej utraty dokładności wzoru empirycznego [10].

#### Zależność współczynnika $\mu$ od parametrów eksploatacyjnych

W ruchu wirowym ciecz opuszcza urządzenie przez pierścieni wypływowy o efektywnym polu przekroju strugi ( $A_e$ ), mniejszym od pola powierzchni ( $A_2$ ) otworu wylotowego ( $d_2$ ) na skutek istnienia rdzenia powietrznego ( $d_a$ ) (rys. 1). Ponadto strugi są odchylone od pionu o kąt rozpylenia cieczy  $\gamma/2$ , co nie jest również uwzględniane w dotychczasowych opisach działania regulatorów wirowych. Biorąc pod uwagę mierzalne parametry eksploatacyjne regulatorów wirowych, celowe wydaje się uwzględnienie parametrów  $d_a$  i  $\gamma$  w analizie ich wpływu na wartość współczynnika  $\mu$ . Średnica rdzenia powietrznego, związana ze stopniem wypełnienia otworu wylotowego zależnością  $\delta=1-(d_a/d_2)^2$ , ogranicza efektywne pole wypływu cieczy z regulatora, a  $\delta$  zależy od bezwymiarowego stosunku  $d_a/d_2$ . Kąt rozpylenia cieczy definiowany jest natomiast wzorem  $\tan(\gamma/2)=z/(x-r_2)$ , w którym  $z$  oznacza współrzędną pionową, a  $x$  poziomą (rys. 1). Wpływ parametrów eksploatacyjnych  $d_a$  i  $\gamma$  na wartość współczynnika przepływu – odniesionego do średnicy otworu wylotowego  $\mu_2=\mu(d_1/d_2)^2$  – przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Zależności współczynnika  $\mu_2 = \mu(d_1/d_2)^2$  od  $d_a/d_2$  oraz od  $\tan(\gamma/2)$  w ruchu wirowym

Z przedstawionych zależności wynika, że wraz ze zwiększaniem wartości stosunku  $d_a/d_2$ , a także wartości funkcji  $\tan(\gamma/2)$ , wartość współczynnika  $\mu_2 = \mu(d_1/d_2)^2$  ulega zmniejszeniu. Zwiększaniu względnej średnicy rdzenia powietrznego ( $d_a/d_2$ ) towarzyszy zmniejszenie stopnia wypełnienia cieczą otworu wylotowego ( $\delta$ ) i zwiększenie wartości kąta rozpylenia ( $\gamma/2$ ). Prowadzi to w efekcie do zwiększenia przepustowości regulatora, mierzonej wartością współczynnika  $\mu(d_1)$ , czyli prowadzi do zmniejszenia oporności hydraulicznej ( $\zeta$ ) urządzenia. Wy tłumaczyć to można tym, że pęd cieczy na zwiększającym się wraz z  $d_a/d_2$  ramieniu (czyli moment pędu) wymusza większy strumień wypływu cieczy z otworu, a siła odśrodkowa powoduje zwiększenie wartości kąta ( $\gamma$ ) rozpylenia cieczy (rozrzut punktów na rys. 10 wynika m.in. z małej dokładności metody pomiaru kąta  $\gamma$  i średnicy  $d_a$  – odczyty ze zdjęć).

W wyniku przeprowadzonych analiz regresji wielokrotnej ustalono następujące wzory empiryczne na  $d_a/d_2$  oraz  $\tan(\gamma/2)$  ( $\gamma$  w stopniach) w funkcji parametrów geometrycznych badanych regulatorów:

$$\frac{d_a}{d_2} = 1,8 - K^{0,084} - 0,05 \frac{d_2}{d_1} - 0,0061 \frac{h_c}{d_1} + 0,0122 \frac{D}{d_1} \quad (11)$$

oraz

$$\tan \frac{\gamma}{2} = 2,38 K^{0,561} \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{2,16} \left( \frac{h_c}{d_1} \right)^{-0,08} \left( \frac{D}{d_1} \right)^{-0,896} \quad (12)$$

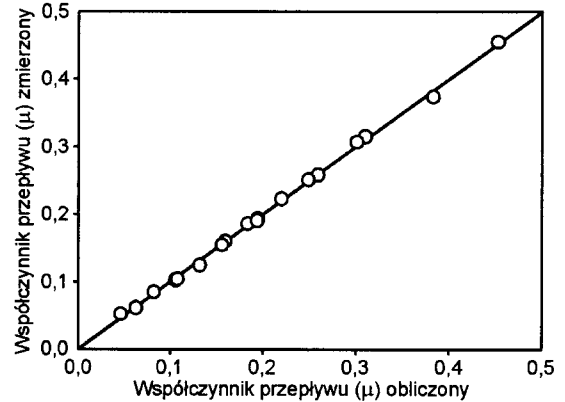
W przypadku wzoru (11) współczynnik determinacji wynosił  $R^2 = 0,993$ , a średni błąd kwadratowy 1,51%, natomiast w przypadku wzoru (12) –  $R^2 = 0,975$ , a średni błąd kwadratowy

3,69%. Wzory (11) i (12) wykorzystano następnie do uszczegółowienia opisu współczynnika  $\mu$ , uwzględniającego zarówno parametry geometryczne, jak i eksploatacyjne. Statystycznie najlepszą zgodność danych zmierzonych z aproksymowanymi uzyskano stosując końcowy wzór w postaci:

$$\mu = K^{-0,189} + \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,064} \left( \frac{h_c}{d_1} \right)^{-0,019} \left( \frac{d_a}{d_2} \right)^{-0,04} - 0,551 \tan \frac{\gamma}{2} - 2,97 \quad (13)$$

przy  $R^2 = 0,999$  oraz średnim błędzie kwadratowym równym 3,45%.

Z przeprowadzonych analiz statystycznych wynika, że wszystkie współczynniki regresji były statystycznie istotne na poziomie ufności 95%. Wprowadzenie do wyjściowego wzoru na  $\mu$  parametrów eksploatacyjnych spowodowało w efekcie dwukrotne zmniejszenie średniego błędu kwadratowego (z 7,3% na 3,5%), co znacznie poprawiło dokładność opisu badanych zależności. Na rysunku 11 przedstawiono porównanie wartości współczynnika  $\mu$  obliczonych ze wzoru (13) z wynikami pomiarów.



Rys. 11. Porównanie współczynnika  $\mu$  obliczonego ze wzoru (13) z wynikami pomiarów

Wyprowadzone zależności obowiązują w następujących przedziałach bezwymiarowych liczb podobieństwa, związanych z zakresem przeprowadzonych badań:  $0,375 \leq d_2/d_1 \leq 2,67$ ,  $1,4 \leq h_c/d_1 \leq 8,73$ ,  $3,63 \leq D/d_1 \leq 9,67$ ,  $0,457 \leq K \leq 49,78$ ,  $1,31 \leq R_o/d_1 \leq 4,33$ ,  $0,40 \leq d_a/d_2 \leq 0,825$ ,  $0,675 \leq \tan(\gamma/2) \leq 1,51$  ( $68^\circ \leq \gamma \leq 114^\circ$ ), przy zachowaniu kryterium podobieństwa Froude'a ( $1 < Fr \leq 65$ ).

## Wnioski

♦ W cylindrycznych regulatorach wirowych wyróżnić można dwa rodzaje przepływu – swobodny oraz wirowy, przy czym na granicy tych ruchów wartość współczynnika przepływu ( $\mu$ ) osiąga wartości maksymalną. W ruchu wirowym wartość współczynnika  $\mu$  początkowo maleje, aby osiągnąć wartość w przybliżeniu stałą powyżej granicznej wartości liczby Froude'a ( $Fr > 1$ ), a także Reynoldsa ( $Re > 30$  tys.). Do zwiększenia wartości współczynnika przepływu dochodzi wraz ze zwiększaniem względnej średnicy króćca wylotowego ( $d_2/d_1$ ), jak i względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$ ), natomiast zwiększenie względnej średnicy komory wirowej ( $D/d_1$ ), jak i względnego promienia zawirowania ( $R_o/d_1$ ) prowadzi do zmniejszenia wartości  $\mu$ . Wartość współczynnika  $\mu$  przy względnym promieniu zawirowania  $R_o/d_1 > 1,5$  ( $D/d_1 > 4$ ) jest w przybliżeniu stała.

♦ Stała regulatora ( $K$ ) ujmuje łączny wpływ bezwymiarowych parametrów  $d_2/d_1$  i  $R_0/d_1$  na wartość współczynnika  $\mu$ , zwiększając dokładność ilościowego opisu działania urządzenia. Wraz ze zwiększaniem wartości stałej  $K$  zmniejsza się wartość współczynnika  $\mu$ . Wartości współczynnika  $\mu$  uzyskane w badaniach regulatorów wirowych zawierały się w przedziale od 0,0521 do 0,455, co odpowiadało wartościom współczynnika strat miejscowych ( $\zeta$ ) odpowiednio od 368 do 5. Obliczone w tym zakresie wartości współczynnika  $\mu$  ze wzoru (13) są obciążone błędem średnim kwadratowym poniżej 4%.

♦ Ze względu na maksymalizację skuteczności dławienia przepływu cieczy racjonalna jest mała wysokość cylindrycznej komory wirowej ( $h/d_1 < 2$ ) – określona średnicą króćca wlotowego przy stosunku  $D/d_1 < 4$  oraz średnicą otworu wylotowego ( $d_2 \geq d_1$ ) – związana z koniecznością zachowania warunku tzw. wolnego przelotu kuli.

♦ Ustalone w pracy wzory empiryczne pozwalają na projektowanie racjonalnych konstrukcji regulatorów wirowych w zakresie ich parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych. Obecnie prowadzone są badania dotyczące regulatorów przepływu ze stożkową komorą wirową.

*Praca naukowa została sfinansowana ze środków przeznaczonych na naukę w latach 2005–2007, jako projekt badawczy własny nr 4T07E 056 29 MNiI.*

## LITERATURA

1. D. THOMA: Die Rückstromdrossel. VDI-Zeitschrift, 1930, 74, S. 1098.
2. R. HEIM: Versuche zur Ausbildung der Thomaschen Rückstrombremse Verlag R. Oldenburg, München 1929.
3. R. ZOBEL: Versuche an der hydraulischen Rückstromdrossel. Ph.D. Thesis, Technische Hochschule München, München 1934.
4. H. BROMBACH: Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau. Ph.D. Thesis, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart 1972.
5. Y.-E. ELALFY: Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdiolen und Drosseln. Ph.D. Thesis, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart 1979.

6. F. HAAKH: Vortex chamber diodes as throttle devices in pipe systems. Computation of transient flow. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(1), pp. 53–59.
7. B. HUBER, R. PRENNER: The influence of a vortex-flow throttle on transmission and reflection of pressure wave. Proc. of 28th IAHR Congress, Graz 1999.
8. M. ANDUZE, S. COLIN, R. CAEN, H. CAMON, V. CONEDERA, T. DO CONTO: Analysis and testing of a fluidic vortex microdiode. Journal of Micromechanical Microengineering, 2001, 11, pp. 108–112.
9. L.W. MAY: Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill, 2001.
10. P. WÓJTOWICZ: Wpływ parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych wybranych regulatorów wirowych na ich charakterystykę hydrauliczną. Praca doktorska, Politechnika Wroclawska, Wroclaw 2007 (praca niepublikowana).
11. H. BROMBACH: Vortex devices in hydraulic engineering. Proc. of 5th Cranfield Fluidic Conference, BHRA, Fluid Engineering, Cranfield, Bedford 1972.
12. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Podstawy projektowania i zasady stosowania regulatorów wirowych przepływu cieczy w systemach wodociągowych i kanalizacyjnych. Etap III – raport końcowy. Politechnika Wroclawska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Raport Serii SPR-1, Wroclaw 2008 (praca niepublikowana).
13. H. BROMBACH: Bistable vortex throttles for sewer flow control. Proc. of IFAC Symp. Pneumatic & Hydraulic Components, Warsaw 1980, pp. 109–113.
14. V. TESAŘ: Superquadratic behaviour of vortex diodes. Proc. of IFAC Symp. Pneumatic and Hydraulic Components, Warsaw 1980, pp. 79–95.
15. G. ABRAMOVICH: Angewandte Gasdynamik. Verlag Technik, Berlin 1958.
16. W.A. BORODIN, Y.F. DITIAKIN, L.A. KLIACHKO, V.I. IA-GODKIN: The Atomization of Liquids. Mashinostroenie, Moskva 1967.
17. N. SYRED, J.M. BEÉR: Combustion in swirling flows: A review. Combustion and Flame, 1974, 25(2), pp. 143–201.
18. F. EBERT: Zur turbulenten Durchströmung einer flachen kreiszylindrischen Kammer. Acta Mechanica, 1977, 25, pp. 241–256.

**Wójtowicz, P., Kotowski, A. Model Testing of Cylindrical Hydraulic Regulators. Ochrona Środowiska 2008, Vol. 30, No. 2, pp. 35–41.**

**Abstract:** Upon analysis of the current knowledge regarding vortex devices, a model test methodology for liquid flow vortex regulators has been developed, which is of practical use in environmental engineering and pollution control. The paper presents a choice of test results elucidating the effect of construction parameters (vortex chamber diameter and height, inlet and outlet diameter), as well as operation parameters (air core

diameter and spray cone angle), on the performance of flow regulators with cylindrical vortex chambers. The investigated functional relations enable a rational choice of geometrical parameters for the regulators in question. It has been demonstrated that when the operation parameters are taken into account, the description of the discharge coefficient of the devices tested gains in accuracy. The empirical formulae derived are of support to the designer of the constructions for such regulators.

**Keywords:** Hydraulics, model testing, liquid flow, cylindrical hydraulic regulator, throttling.