

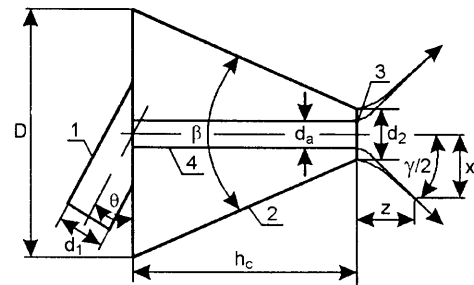
Patryk Wójtowicz, Andrzej Kotowski

## Badania modelowe stożkowych regulatorów hydrodynamicznych

Regulatory przepływu cieczy są stosowane w celu ograniczenia jej strumienia objętości. Urządzenia dławiące, takie jak krzyżki, zwężki czy zasowy, umożliwiają dławienie strumienia cieczy przez zmniejszenie czynnego przekroju regulatora, co w przypadku cieczy zanieczyszczonych powodować może ich zatykanie. Ruchome części mechaniczne tradycyjnych urządzeń dławiących zmniejszają niezawodność ich działania, natomiast tych wad pozbawione są regulatory hydrodynamiczne o wirowym ruchu cieczy.

Pierwowzorem urządzeń wirowych był opatentowany przez Thoma [1] cylindryczny 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 analogię działania do diody nazywane jest także w literaturze diodą wirową (niem. Wirbelkammerdiode, ang. vortex diode). Cylindryczny zawór zwrotny stał się obiektem badań podjętych w pracach doktorskich Heima [2] oraz Zobela [3], w których optymalizowano jego parametry geometryczne tak, aby uzyskać jak największą wartość stosunku oporów przepływu dławionego do przepływu swobodnego. Gdy urządzenie wirowe działa wyłącznie dławiąco, nazywane jest w literaturze regulatorem przepływu (ang. vortex flow regulator), ale też dławikiem bądź zaworem wirowym (niem. Wirbel-drossel) [4]. W systemach wodociągowych i kanalizacyjnych regulatory wirowe służą do dławienia przepływu cieczy głównie w obiektach do oczyszczania wody i ścieków [5]. Pierwsze zastosowane regulatory wirowe miały komorę cylindryczną, a pod koniec lat 70. wprowadzono regulatory o stożkowej komorze wirowej [6]. Regulatory takie bowiem cechują się mniejszym oporem hydraulicznym przy swobodnym przepływie, w porównaniu z regulatorami cylindrycznymi. Przedmiotem niniejszej pracy są regulatory hydrodynamiczne o stożkowej komorze wirowej (rys. 1).

W stożkowym regulatorze wirowym ciecz dopływa do urządzenia przez króciec wlotowy (1), umieszczony w większej podstawie stożka, dzięki czemu nadawany jest jej ruch wirowy, który utrzymuje się na całej długości komory (2) aż do otworu wylotowego (3) w węższym końcu stożka ściętego. W ruchu tym prędkość obwodowa zwiększa się wraz ze zbliżaniem się do osi stożka, a dzięki sile odśrodkowej w komorze wirowej ciśnienie maleje w kierunku jej osi, aby na powierzchni rdzenia powietrznego (4) osiągnąć ciśnienie otoczenia.

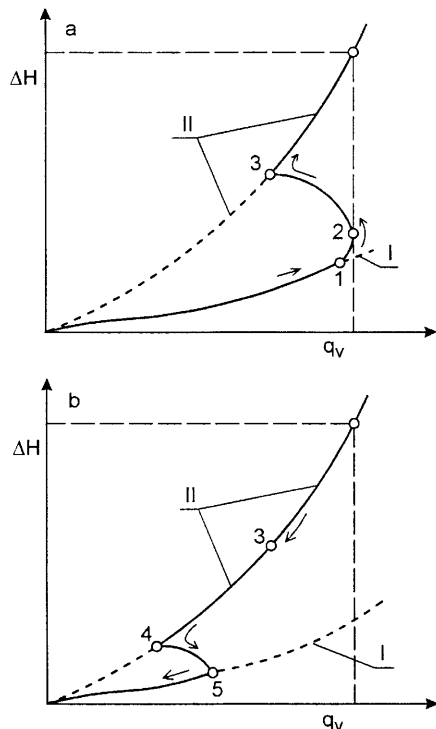


Rys. 1. Schemat stożkowego regulatora wirowego  
Fig. 1. Schematic diagram of the conical vortex flow regulator

Wytwarzający się rdzeń powietrzny ma istotny wpływ na skuteczność dławiącego działania urządzenia. Oś stożka jest najczęściej odchylona od poziomu o pewien kąt, tak że jedna z tworzących stożka jest pozioma, aby następowało samoodwadnianie urządzenia. Rozpylana ciecz na odpływie z regulatora tworzy stożek o kącie rozwarcia  $\gamma$ .

Charakterystyka hydrauliczna ( $\Delta H=f(q_v)$ ) stożkowych regulatorów wirowych cechuje się histerezą, występującą w początkowym zakresie ich pracy (przy małych wysokościach naporu  $\Delta H$ ), gdzie charakterystyka przy rosnącym ciśnieniu na dopływie nie pokrywa się z charakterystyką przy ciśnieniu malejącym (w regulatorach o cylindrycznym kształcie komory wirowej nie występuje zjawisko histerezy, a funkcja  $\Delta H=f(q_v)$  jest ciągła i monotoniczna w całym zakresie jej zmienności). W celu ilustracji, przedstawiono przebieg charakterystyki hydraulicznej regulatora stożkowego w sytuacji wzrastającego ciśnienia na dopływie (rys. 2a) oraz w czasie zmniejszania ciśnienia na dopływie (rys. 2b). Punktami 1–5 oznaczono kolejne (charakterystyczne) stany występujące podczas pracy urządzenia. Zasadniczy efekt dławiący w regulatorze osiągnąć jest przez wymuszenie w urządzeniu przepływu wirowego, co wymaga odpowiedniej wysokości naporu ( $\Delta H$ ) cieczy wpływającej do urządzenia. Początkowo, gdy napór jest mały, ciecz przepływa swobodnie. Bezciśnieniowy przepływ cieczy przez regulator stożkowy ograniczony jest przez przepustowość otworów wlotowego i wylotowego (krzywa I na odcinku 0–1, rys. 2a). W miarę wzrostu ciśnienia i prędkości dopływającej cieczy, przepływ ze swobodnym zwierciadłem ulega zamianie na ciśnieniowy.

Wzrastające ciśnienie na dopływie powoduje w pewnym momencie zamknięcie (p. 2), a następnie wyparcie (p. 3) powietrza z górnej części stożka komory wirowej i powstanie ruchu wirowego z napowietrzonym rdzeniem (krzywa II, rys. 2a). Energia potencjalna cieczy zostaje wtedy zamieniona na energię kinetyczną wiru. W wyniku działania siły odśrodkowej ciśnienie jest największe na obwodzie większej podstawy stożka, co wraz z rdzeniem powietrznym zmniejszającym efektywne pole powierzchni otworu odpływowego (w mniejszej



Rys. 2. Przykład charakterystyki hydraulicznej regulatora stożkowego (a – wzrastające ciśnienie na dopływie, b – malejące ciśnienie na dopływie)  
Fig 2. An example of the hydraulic characteristic of the conical regulator (a – pressure increase at the inlet, b – pressure decrease at the inlet)

podstawie stożka) skutecznie dławi dopływ cieczy do urządzenia. W ten sposób, pomimo braku przewężenia na dopływie, powstaje znaczny opór hydrauliczny, odpowiadający zastosowaniu np. krzyży o powierzchni przekroju poprzecznego kilkukrotnie mniejszym od przekroju króćca wlotowego do regulatora. Z kolei opadający poziom ( $\Delta H$ ) cieczy po stronie dopływu do regulatora (rys. 2b) powoduje, że przepływ przez urządzenie zaczyna maleć, a charakterystyka hydrauliczna regulatora stożkowego pokrywa się z charakterystyką przepływu wzrastającego (do p. 3 na krzywej II). Dzieje się tak dalej, aż do momentu zapowietrzenia się urządzenia (p. 4). Wówczas ruch wirowy nagle zanika, powodując powstanie tzw. fali płuczącej (p. 5 na wyjściowej charakterystyce przepływu, krzywa I). Zjawisko wolnego powstawania (p. 1–3, rys. 2a), a następnie nagłego zaniku (p. 4–5, rys. 2b) ruchu wirowego przy zmianach wysokości naporu ( $\Delta H$ ) powoduje, że charakterystyka hydrauliczna urządzenia jest bistabilna [6]. Pomijając obszar histerezy, na charakterystykę hydrauliczną regulatorów stożkowych składają się dwie krzywe: łagodna (krzywa I) – małego oporu hydraulicznego (przepływ niewirowy) oraz stroma (krzywa II) – dużego oporu hydraulicznego urządzenia (przepływ wirowy).

### Cel i zakres badań

Pomimo znacznej liczby opracowań, głównie z dziedziny automatyki strumieniowej, a dotyczących wzmacniaczy przepływu, tzw. triody czy też diody wirowej, w literaturze dostępne są tylko nieliczne badania regulatorów wirowych, w tym stożkowych, a samo urządzenie traktowane jest nadal jako tzw. czarna skrzynka. Dotychczasowy analityczny opis działania regulatorów wirowych sprowadza się do wzoru Torricellego, w którym współczynnik przepływu wyznaczany jest doświadczalnie, osobno w przypadku każdego regulatora [7–12]. Brak jawnych charakterystyk hydraulicznych, określających

związek ilościowy i jakościowy parametrów geometrycznych oraz eksploatacyjnych z dławiącym działaniem urządzenia, mierzonym takimi parametrami, jak współczynnik oporów miejscowych ( $\zeta$ ) czy też współczynnik przepływu ( $\mu$ ), uniemożliwia ocenę wiarygodności działania takich urządzeń – zwłaszcza o dużych gabarytach.

W pracy podjęto badania modelowe stożkowych regulatorów wirowych (w skali półtechnicznej), mające na celu określenie wpływu parametrów geometrycznych i eksploatacyjnych na sprawność ich dławienia. W wyniku badań ustalono wzory empiryczne uzależniające wartość współczynnika przepływu od wymiarów konstrukcyjnych urządzeń, a także od kąta rozpylenia cieczy ( $\gamma$ ), które mogą być wykorzystane do ich racjonalnego projektowania i stosowania. Badania takie nie mają odpowiednika w literaturze przedmiotu.

Modele badanych regulatorów montowane były z elementów składowych w taki sposób, aby można było uzyskać zmiany ich parametrów geometrycznych w możliwie szerokim zakresie. Poszczególne elementy wykonane były ze stali nierdzewnej i połączone za pomocą kołnierzy uszczelnionych o-ringami. Zmianiane były takie parametry geometryczne, jak średnica króćca wlotowego ( $d_1$ ) i średnica otworu wylotowego ( $d_2$ ), a także wysokość komory wirowej ( $h_c$ ) oraz kąt wejścia króćca wlotowego ( $\theta$ ) względem płaszczyzny podstawy stożka. Średnica większej podstawy stożka komory wirowej wynosiła  $D=290$  mm, a grubość (sfazowania) krawędzi otworu odpływowego (w mniejszej podstawie stożka –  $d_2$ ) wynosiła  $s=2$  mm. W tabeli 1 podano wymiary badanych konstrukcji regulatorów stożkowych oraz – jako przykład – ustalone

Tabela 1. Charakterystyka stożkowych regulatorów wirowych ( $\theta=30^\circ$ )  
Table 1. Parameters of conical vortex flow regulators ( $\theta=30^\circ$ )

Seria	$d_1$ mm	$d_2$ mm	$h_c$ mm	$\mu$	$\zeta$	$\gamma$ stopień
1	30	30	140	0,178	31,6	103
2	30	50	140	0,284	12,4	112
3	30	80	140	0,402	6,2	125
4	50	30	140	0,106	89,0	91
5	50	50	140	0,188	28,3	100
6	50	80	140	0,303	10,9	117
7	80	30	140	0,068	216,3	80
8	80	50	140	0,136	54,1	90
9	80	80	140	0,243	16,9	97
10	30	30	280	0,208	23,1	109
11	30	50	280	0,328	9,3	113
12	30	80	280	0,455	4,8	118
13	50	30	280	0,117	73,1	97
14	50	50	280	0,209	22,9	102
15	50	80	280	0,329	9,2	110
16	80	30	280	0,072	192,9	72
17	80	50	280	0,142	49,6	82
18	80	80	280	0,254	15,5	97
19	30	30	420	0,235	18,1	96
20	30	50	420	0,367	7,4	109
21	30	80	420	0,497	4,0	114
22	50	30	420	0,126	63,0	87
23	50	50	420	0,222	20,3	97
24	50	80	420	0,350	8,2	107
25	80	30	420	0,074	182,6	72
26	80	50	420	0,149	45,0	81
27	80	80	420	0,264	14,3	95

doświadczalnie wartości współczynników  $\mu$ ,  $\zeta$  oraz kąta rozpylenia cieczy ( $\gamma$ ) w seriach pomiarowych nr 1–27, przy kącie wejścia króćca wlotowego  $\theta=30^\circ$ .

Łącznie, w 81 seriach pomiarowych, zbadano model urządzenia o wysokości komory wirowej ( $h_c$ ) wynoszącej 140 mm, 280 mm i 420 mm, przy średnicy króćca wlotowego ( $d_1$ ) 30 mm, 50 mm i 80 mm oraz kącie  $\theta$  równym  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $60^\circ$ , przy czym przy każdej średnicy króćca wlotowego ( $d_1$ ) średnica otworu wylotowego ( $d_2$ ) przyjmowała wartości 30 mm, 50 mm i 80 mm. Maksymalną wartość liczby Froude'a ( $Fr=97,4$ ) osiągnięto przy naporze  $\Delta H=4,6$  mH<sub>2</sub>O i przepustowości  $q_v=3,8$  dm<sup>3</sup>/s regulatora o  $d_1=30$  mm,  $d_2=80$  mm,  $h_c=420$  mm i  $\theta=60^\circ$ .

## Stanowisko doświadczalne

Stanowisko doświadczalne składało się z dwóch zasadniczych układów – badawczego i zasilającego (rys. 3). Układ badawczy tworzyły komora dopływowa (1), komora odpływowa (2) oraz przelew mierniczy (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). Przelew teleskopowy (10) wraz z przegrodą żaluzjową (11) umożliwiał badania regulatora (12) w warunkach zabudowy na sucho i na mokro.

Wzorcowanie przelewu mierniczego (trójkątnego) wykonano metodą objętościową, natomiast cyfrowe przetworniki ciśnienia (14) wzorcowano za pomocą piezometrów (13). Kąt rozpylenia cieczy ( $\gamma$ ) zmierzono metodą fotograficzną, z wykorzystaniem aparatu cyfrowego oraz programu Autocad 2004.

## 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 króćca wlotowego ( $r_1$ ) i 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 bezwymiarowych liczb podobieństwa oraz parametrów:

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

w której:

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

$Fr$  – liczba Froude'a ( $Fr=q_v^2/2g\pi^2 r_1^5$ )

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

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

a stąd wobec  $1/\sqrt{\zeta}=\mu$ :

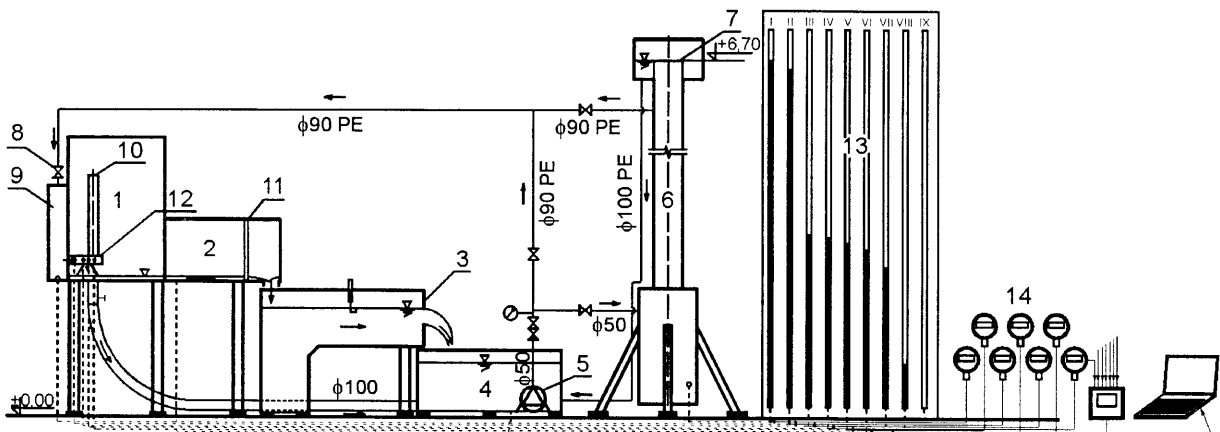
$$q_v = \mu A_1 \sqrt{2g\Delta H} \quad (4)$$

Zapis (4) określa się w literaturze jako wzór Torricellego, w którym  $\mu$  jest współczynnikiem przepływu (będącym funkcją analogiczną do postaci (2)), obliczanym ze wzoru:

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

Takie podejście do zagadnienia jest – jak dotychczas – powszechnie stosowane do opisu ilościowego działania regulatorów wirowych, a wartość współczynnika  $\mu$ , obliczana ze wzoru (5) służy głównie do porównania efektu dławienia przepływu z klasycznymi urządzeniami dławiącymi [6,8,10,13].

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



Rys. 3. Schemat stanowiska doświadczalnego  
Fig. 3. Schematic diagram of the experimental set-up

$$K = \frac{R_0 \cos \theta r_1^2}{r_2^3} = \frac{2R_0 \cos \theta d_1^2}{d_2^3} \quad (6)$$

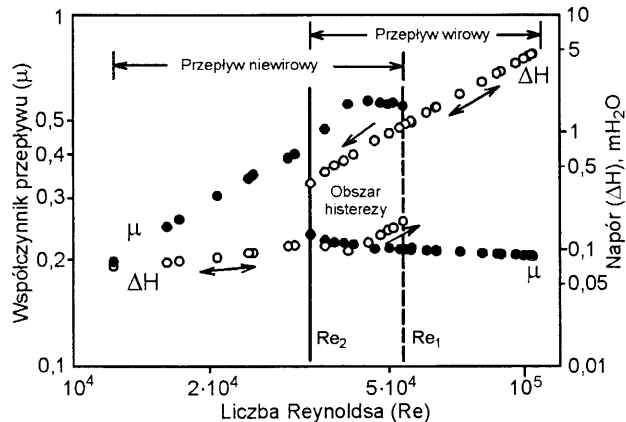
jako stałą geometryczną ( $K$ ) badanych regulatorów wirowych. Zmiana kąta wejścia króćca wlotowego do regulatora przy  $\theta < 90^\circ$  skutkuje zmniejszeniem momentu pędu na wlocie do regulatora o wartość funkcji  $\cos \theta$  (w przypadku regulatorów cylindrycznych kąt  $\theta = 90^\circ$  i wówczas  $\cos \theta = 1$ ). Oprócz stałej geometrycznej  $K$ , do zapisu (2) wprowadzono dodatkowo funkcję trygonometryczną  $\cos \theta$  – kąta wejścia króćca wlotowego. Wówczas funkcja współczynnika  $\mu$  (analogicznie do  $\zeta$ ) przyjmuje ostatecznie postać:

$$\mu = \mu \left( \text{Re}, \text{Fr}, K, \frac{R}{d_1}, \frac{r_0}{d_1}, \frac{r_2}{d_1}, \frac{h_c}{d_1}, \frac{s}{s_1}, \frac{k}{d_1}, \cos \theta \right) \quad (7)$$

Istotność wpływu poszczególnych bezwymiarowych parametrów i liczb podobieństwa na wartość współczynnika  $\mu$  została zbadana doświadczalnie.

### Przepływy niewirowe i wirowe w regulatorach hydrodynamicznych

W regulatorach wirowych wyróżnić można dwa rodzaje przepływów, tj. niewirowe (w tym swobodne i ciśnieniowe) oraz wirowe (ciśnieniowe). Wraz ze wzrostem wartości liczby Reynoldsa wartość współczynnika przepływu zwiększa się, osiągając wartość maksymalną w momencie przejścia ruchu niewirowego w wirowy. Wyraźna granica pomiędzy ruchem niewirowym a wirowym (przy  $\text{Re}_1$ ) widoczna jest po przedstawieniu zależności współczynnika  $\mu$  od liczby  $\text{Re}$  (przy uwzględnieniu zmiany wysokości ciśnienia  $\Delta H$ ) w skali logarytmicznej (rys. 4 – strzałkami oznaczono kierunki zwiększania bądź zmniejszania się  $\Delta H$ ).



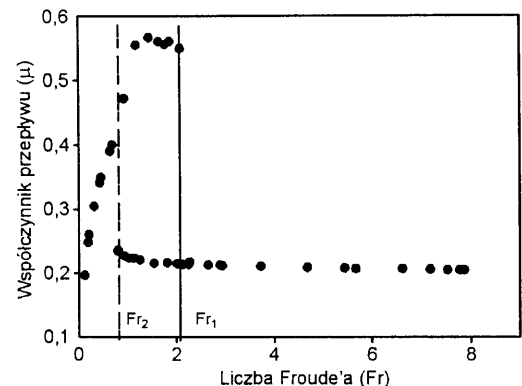
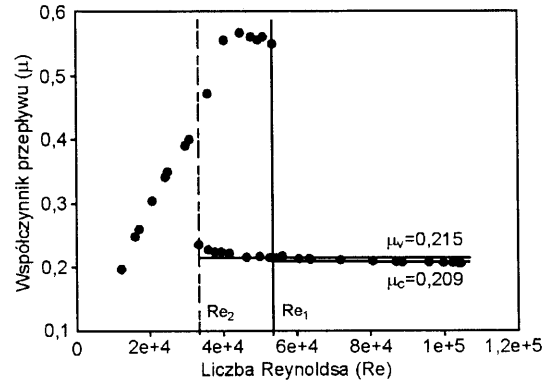
Rys. 4. Zależność współczynnika  $\mu$  od  $\text{Re}$  przy zmianach  $\Delta H$  (seria nr 14)  
Fig. 4. Coefficient  $\mu$  related to  $\text{Re}$  number at  $\Delta H$  variations (series 14)

Ze względu na nieciągłość charakterystyki hydraulicznej regulatora, obszar histerezy ograniczają dwie wartości liczby Reynoldsa – górna ( $\text{Re}_1$ ), opisująca przejście z ruchu niewirowego w wirowy (zwiększające się  $q_v$  i  $\Delta H$ ), oraz dolna ( $\text{Re}_2$ ), oddzielająca strefę ruchu wirowego od niewirowego (zmniejszające się  $q_v$  i  $\Delta H$ ). Wartości liczby Reynoldsa ( $\text{Re}_1$  i  $\text{Re}_2$ ) ograniczają więc obszar bistabilności działania regulatora stożkowego. W obszarze tym jednej wartości liczby Reynoldsa (czyli  $q_v$ ) odpowiadają dwie wartości  $\Delta H$  i  $\mu$  (w ruchu niewirowym i wirowym). Z przedstawionego przykładowego wykresu (rys. 4) wynika, że w obszarze histerezy wartości liczby  $\text{Re} \approx 5 \cdot 10^4$  odpowiada  $\mu \approx 0,56$  w ruchu niewirowym oraz

$\mu \approx 0,22$  w ruchu wirowym. W dalszych rozważaniach pominięto obszar ruchu niewirowego, jako nieistotny z punktu widzenia maksymalizacji skuteczności dławienia przepływu cieczy w badanych regulatorach hydrodynamicznych.

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

Z zależności współczynnika  $\mu$  od liczb Reynoldsa i Froude'a (rys. 5) wynika, że w ruchu wirowym przy wartościach liczb  $\text{Re} > 50$  tys. oraz  $\text{Fr} > 2$  jego wartość praktycznie nie zależy od  $\text{Re}$  i  $\text{Fr}$ .



Rys. 5. Zależność współczynnika  $\mu$  od  $\text{Re}$  i  $\text{Fr}$   
( $d_1 = d_2 = 50$  mm,  $h_c = 280$  mm,  $\theta = 30^\circ$ )

Fig. 5. Coefficient  $\mu$  related to  $\text{Re}$  and  $\text{Fr}$  numbers

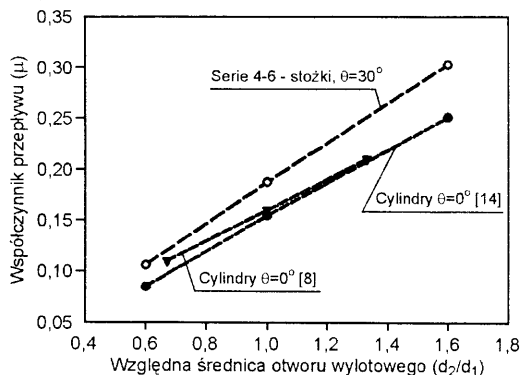
W szczególności z analizy zależności współczynnika przepływu od liczby Reynoldsa wynika, że w dolnym zakresie ruchu wirowego, w obszarze histerezy ( $\text{Re}_2 < \text{Re} < \text{Re}_1$ ) jego wartość w niewielkim stopniu zależy od  $\text{Re}$ . Ponieważ badania wykonano na pomniejszych modelach obiektów rzeczywistych, praktyczne znaczenie do oceny wartości  $\mu$  mają wyniki pomiarów osiągnięte przy dużych wartościach  $\text{Re} > \text{Re}_1$ , gdzie wartość współczynnika  $\mu$  jest praktycznie stała. Średnią wartość współczynnika przepływu obliczoną z całego zakresu ruchu wirowego ( $\mu_w$ ), tj. powyżej granicznej wartości  $\text{Re}_2$ , porównywano ze średnią wartością ( $\mu_c$ ) obliczoną z zakresu powyżej granicznej wartości  $\text{Re}_1$ . Średnie te różniły się przeciętnie o 1,4% (maks. o 3,5%), co pozwala przyjąć  $\mu_c = \mu$  do uogólnienia wyników badań [14].

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

Poza liczbami podobieństwa  $\text{Re}$  i  $\text{Fr}$ , analizie wpływu na współczynnik  $\mu$  poddano bezwymiarowe stosunki:  $d_2/d_1$ ,  $h_c/d_1$ ,  $D/d_1$ ,  $R_0/d_1$  oraz  $K$  i  $\cos \theta$ , eliminując  $k/d_1$  oraz  $s/d_1$ . W pracach [3,8] wykazano bowiem, 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. maksymalizacji oporu przepływu. Modele regulatorów (w skali półtechnicznej) wykonano więc z gładkiej stali (nierdzewnej) – jak w warunkach technicznych. Grubość (s) szfowania krawędzi otworu odpływowego (w mniejszej podstawie stożka ściętego) wszystkich badanych modeli regulatorów wynosiła 2 mm, co było zbliżone do grubości blachy w warunkach technicznych.

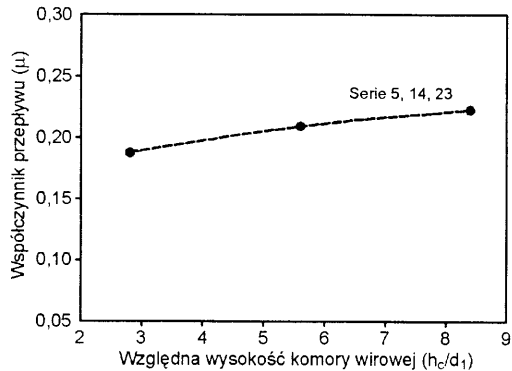
Z wykresu na rysunku 6 wynika, że wraz ze wzrostem stosunku  $d_2/d_1$  (w seriach 4–6, tab. 1) wzrosła wartość współczynnika przepływu ( $\mu=0,106, 0,188$  i  $0,303$ ), a tym samym zmniejszył się opór hydrauliczny urządzenia ( $\zeta=89,0, 28,3$  i  $10,9$ ). W celu porównania regulatorów stożkowych z cylindrycznymi na wykres naniesiono też wyniki uzyskane w pracy [8] w przypadku cylindrycznego zaworu wirowego przy przepływie dławiącym o  $D/d_1=5$  oraz  $h_c/d_1=1$  i  $\theta=0^\circ$  (tj. o średnicy komory  $D=75$  mm i  $d_1=15$  mm przy  $h_c=15$  mm), przy stosunku  $d_2/d_1=0,67, 1,0$  i  $1,33$ . Zamieszczono także wyniki badań własnych dotyczące cylindrycznego regulatora wirowego o  $D/d_1=5,8, h_c/d_1=1,64$  i  $\theta=0^\circ$  ( $D=290$  mm i  $d_1=50$  mm przy  $h_c=82$  mm), przy  $d_2/d_1=0,6, 1,0$  i  $1,6$  [14]. Z tego porównania wynika, że również w przypadku cylindrycznej komory wirowej zależność  $\mu$  od  $d_2/d_1$  była wyraźnie rosnąca (ściśle porównanie ilościowo skuteczności dławienia stożków i cylindrów przy różnych stosunkach  $D/d_1, h_c/d_1$  i kącie  $\theta$  nie było jednak możliwe).



Rys. 6. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $d_2/d_1$  ( $D/d_1=5,8, h_c/d_1=2,8, \theta=30^\circ, d_1=50$  mm)  
Fig. 6. Coefficient  $\mu$  related to the  $d_2/d_1$  ratio

Na rysunku 7 zilustrowano zależność współczynnika  $\mu$  od względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$ ), w przypadku regulatorów stożkowych badanych w seriach 5, 14 i 23 ( $h_c=140$  mm,  $280$  mm i  $420$  mm), przy  $d_1=d_2=50$  mm.

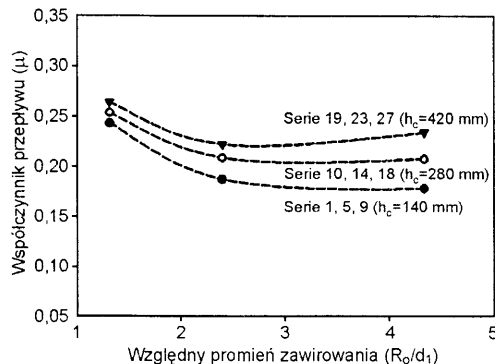
Z przedstawionej zależności (rys. 7) wynika, że trzykrotne zwiększenie względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$  z  $2,8$  do  $8,4$ ) wywołało tylko kilkunastoprocentowe zwiększenie



Rys. 7. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $h_c/d_1$  ( $D/d_1=5,8, d_2/d_1=1, \theta=30^\circ$ )  
Fig. 7. Coefficient  $\mu$  related to the  $h_c/d_1$  ratio

wartości współczynnika  $\mu$  (z  $0,188$  do  $0,222$ ), przy stałych pozostałych parametrach geometrycznych. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wysokości komory wirowej opór hydrauliczny ( $\zeta$ ) urządzenia uległ zmniejszeniu. Wpływ warstwy przyściennej na rozkład prędkości i ciśnienia jest więc znaczny w komorach wirowych o małej wysokości, tzn. gdy  $h_c/R \ll 1$  [16]. Ze względu na efekt dławienia, racjonalne jest więc projektowanie stożkowych komór wirowych o możliwie małej wysokości.

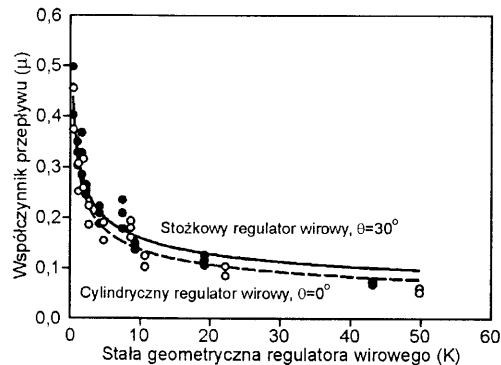
Na rysunku 8 przedstawiono zależność współczynnika przepływu od względnego promienia zawirowania ( $R_0/d_1$ ). Wraz ze wzrostem wartości  $R_0/d_1$  wartość współczynnika przepływu malała, czyli wzrastał opór urządzenia.



Rys. 8. Zależność współczynnika  $\mu$  od stosunku  $R_0/d_1$  ( $d_2/d_1=1, \theta=30^\circ$ )  
Fig. 8. Coefficient  $\mu$  related to the  $R_0/d_1$  ratio

W badanym przedziale zmienności  $R_0/d_1$  zawierającym się w granicach od  $1,31$  do  $4,33$ , współczynnik  $\mu$  osiągał wartość w przybliżeniu stałą przy  $R_0/d_1 > 2,5$ . Należy zatem wnioskować, że w wyniku zwiększenia promienia  $R_0$ , a więc i średnicy ( $D$ ) komory wirowej (względem średnicy króćca wlotowego  $d_1$ ), zwiększy się powierzchnia styku wirującej cieczy ze ścianami i wzrosną opory ruchu. Ponieważ przyrost pędu równoważony jest wówczas siłami tarcia, nieracjonalne jest zatem projektowanie takich regulatorów przy stosunku  $R_0/d_1 > 2,5$  i  $d_2/d_1=1$  (czyli odpowiednio przy  $D/d_1 > 6,0$ ).

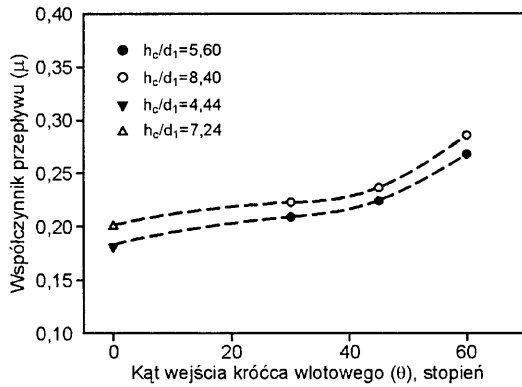
Stała regulatora  $K$  grupuje w sobie takie parametry geometryczne stożkowych regulatorów wirowych, jak  $d_1, d_2, R_0$  i  $\theta$  – wzór (6). Wykres zależności współczynnika  $\mu$  od  $K$  przedstawiono na rysunku 9. Z przebiegu tej zależności wynika, że wraz ze wzrostem wartości  $K$  maleje wartość współczynnika  $\mu$ , czyli rośnie opór hydrauliczny stawiany przez regulator. Przy określonej wartości  $K$ , trzy wartości  $\mu$  odpowiadają zmianom wysokości komory stożka  $h_c=140$  mm,  $280$  mm i  $420$  mm przy  $\theta=30^\circ$ . Innymi słowy, wraz ze wzrostem  $h_c$  rośnie wartość  $\mu$  przy danej wartości  $K$ . Na wykres naniesiono też wyniki badań własnych [16] cylindrycznych regulatorów



Rys. 9. Zależność współczynnika  $\mu$  od stałej  $K$   
Fig. 9. Coefficient  $\mu$  related to the constant  $K$

wirowych przy  $\theta=0^\circ$ . Wówczas we wzorze (6)  $\cos\theta=1$ , co podkreśla uniwersalną postać stałej regulatora K.

Na rysunku 10 przedstawiono zależność współczynnika przepływu ( $\mu$ ) od kąta wejścia króćca wlotowego ( $\theta$ ) w przypadku regulatorów o  $h_c/d_1=5,6$  i  $8,4$ .



Rys. 10. Zależność współczynnika  $\mu$  od kąta  $\theta$  przy różnych  $h_c/d_1$  ( $d_2/d_1=1$ ,  $D/d_1=5,8$ )

Fig. 10. Coefficient  $\mu$  related to the angle  $\theta$  for different values of the  $h_c/d_1$  ratio

Z wykresu wynika, że zmiana kąta wejścia króćca wlotowego wywołała zmianę wartości współczynnika przepływu. W zakresie kąta  $\theta$  od  $30^\circ$  do  $45^\circ$  wartość współczynnika przepływu rosła nieznacznie, dopiero wzrost kąta  $\theta$  powyżej  $45^\circ$  spowodował już istotne zwiększenie wartości współczynnika  $\mu$ , czyli znaczne zmniejszenie wartości oporu  $\zeta$  urządzenia. Na wykres naniesiono też dwa wyniki testów regulatorów stożkowych o  $\theta=0^\circ$  [14] osiągnięte przy zbliżonych stosunkach  $h_c/d_1=4,44$  i  $7,24$  oraz identycznych wartościach  $D/d_1=5,8$ , co pozwala określić kierunek przebiegu badanej zależności w zakresie kąta  $\theta$  od  $0^\circ$  do  $30^\circ$ .

### Wzory empiryczne

Z analizy przedstawionych graficznie zależności współczynnika  $\mu$  od poszczególnych bezwymiarowych parametrów:  $d_2/d_1$ ,  $h_c/d_1$ ,  $D/d_1$ ,  $R_o/d_1$ , kąta  $\theta$  oraz stałej K wynika, że parametry te mogą być aproksymowane za pomocą funkcji potęgowej ( $y=a_0x^{a_1}$ ) bądź liniowej ( $y=a+bx$ ). Do uogólnienia wyników badań przyjęto złożony model opisu zależności współczynnika przepływu od bezwymiarowych liczb podobieństwa. Największą zgodność wyników pomiarów i obliczeń uzyskano w przypadku kombinacji liniowej zależności  $\mu$  od  $d_2/d_1$  i  $h_c/d_1$  oraz zamiennie  $D/d_1$  z  $R_o/d_1$ , a potęgowej zależności od stałej K oraz funkcji  $\cos\theta$ . Stała regulatora wirowego (K) zwiększa dokładność ilościowego opisu zjawiska. W wyniku analizy statystycznej za pomocą regresji wielokrotnej, metodą najmniejszych kwadratów ustalono zależność na  $\mu$  (81 serii) w postaci:

$$\mu = 0,66 - 0,067 \frac{d_2}{d_1} + 0,0068 \frac{h_c}{d_1} + 0,0055 \frac{D}{d_1} + 0,553K^{-0,239} - 0,841(\cos\theta)^{-0,015} \quad (8)$$

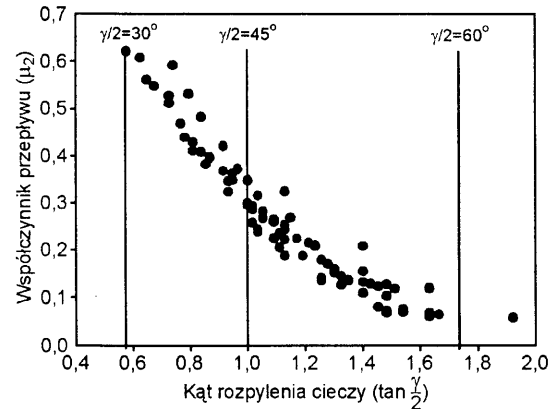
przy  $R^2=0,994$  oraz średnim błędzie kwadratowym 6,2%. Współczynniki regresji były statystycznie istotne na poziomie ufności 95%.

### Zależność współczynnika $\mu$ od kąta rozpylenia cieczy

Należy podkreślić, że w ruchu wirowym ciecz opuszcza urządzenie przez pierścień wypływu o efektywnym polu przekroju strugi  $A_e$ , mniejszym od pola powierzchni otworu

wylotowego  $A_2$  (o średnicy  $d_2$ ), na skutek istnienia rdzenia powietrznego o średnicy  $d_a$  (rys. 1). Ponadto strugi są odchyłone od osi stożka o kąt rozpylenia cieczy  $\gamma/2$ , co nie było uwzględniane w dotychczasowych opisach działania regulatorów wirowych. Wydaje się celowe uwzględnienie kąta  $\gamma$  w analizie jego wpływu na współczynnik  $\mu$  (ze względów technicznych nie był możliwy pomiar średnicy rdzenia powietrznego ( $d_a$ ) w modelach wykonanych w całości ze stali).

Funkcję kąta rozpylenia cieczy zdefiniowano wzorem  $\tan(\gamma/2)=z/(x-r_2)$ , w którym  $z$  i  $x$  są współrzędnymi strugi (rys. 1). Wpływ kąta rozpylenia ( $\gamma/2$ ) na wartość współczynnika przepływu  $\mu_2=\mu(d_1/d_2)^2$ , odniesionego do średnicy otworu wylotowego we wszystkich 81 badanych modelach regulatorów stożkowych, przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Zależność współczynnika  $\mu_2=\mu(d_1/d_2)^2$  od  $\tan(\gamma/2)$

Fig. 11. Coefficient  $\mu_2=\mu(d_1/d_2)^2$  related to  $\tan(\gamma/2)$

Z badań regulatorów o cylindrycznym kształcie komory wirowej [14] wynika, że wraz ze wzrostem wartości zarówno stosunku  $d_a/d_2$ , jak i funkcji  $\tan(\gamma/2)$ , wartość współczynnika  $\mu_2=\mu(d_1/d_2)^2$  ulega zmniejszeniu, natomiast zwiększaniu względnej średnicy rdzenia powietrznego ( $d_a/d_2$ ) towarzyszyło zmniejszenie stopnia wypełnienia cieczą ( $\delta$ ) otworu wylotowego i wzrost wartości kąta rozpylenia ( $\gamma/2$ ). Przewodziło to w efekcie do wzrostu przepustowości regulatora mierzonej współczynnikiem  $\mu(d_1)$ , czyli do spadku oporności hydraulicznej ( $\zeta$ ) urządzenia. Wy tłumaczyć to można tym, że pęd cieczy (w płaszczyźnie otworu wylotowego) na rosnącym wraz z  $d_a/d_2$  ramieniu (moment pędu) wymuszał większy strumień wypływu cieczy z otworu, a siła odśrodkowa powodowała wzrost wartości kąta  $\gamma$  rozpylenia cieczy.

W wyniku przeprowadzonych analiz regresji wielokrotnej ustalono następujący wzór empiryczny na  $\tan(\gamma/2)$  ( $\gamma$  w stopniach) w przypadku badanych regulatorów w funkcji ich parametrów geometrycznych:

$$\tan \frac{\gamma}{2} = 2,8K^{1,61} (\cos\theta)^{-1,36} \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^{5,2} \left(\frac{h_c}{d_1}\right)^{-0,077} \left(\frac{D}{d_1}\right)^{-1,82} \quad (9)$$

We wzorze (9) współczynnik korelacji wyniósł  $R^2=0,955$  przy średnim błędzie kwadratowym równym 5,2%. Powyższy wzór wykorzystano następnie do uszczegółowienia opisu  $\mu$ , uwzględniającego zarówno parametry geometryczne, jak i parametr eksploatacyjny. Statystycznie najlepszą zgodność danych zmierzonych z aproksymowanymi zapewnił końcowy wzór w postaci:

$$\mu = 0,027 \frac{d_2}{d_1} + 0,0056 \frac{h_c}{d_1} - 0,0018 \frac{D}{d_1} + 0,49K^{-0,19} - 0,005 \left( \tan \frac{\gamma}{2} \right)^{4,9} - 0,214 \quad (10)$$

przy  $R^2=0,995$  oraz średnim błędzie kwadratowym 5,6%.

Wyprowadzone zależności obowiązują w następujących przedziałach liczb podobieństwa, związanych z zakresem przeprowadzonych badań:

$$0,375 \leq d_2/d_1 \leq 2,67,$$

$$1,75 \leq h_c/d_1 \leq 14,$$

$$3,63 \leq D/d_1 \leq 9,67,$$

$$0,229 \leq K \leq 43,1,$$

$$1,31 \leq R_o/d_1 \leq 4,33,$$

$$0,5 \leq \cos \theta \leq 0,87 \quad (30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ),$$

$$0,58 \leq \tan(\gamma/2) \leq 1,92 \quad (60^\circ \leq \gamma \leq 125^\circ),$$

przy zachowaniu kryterium podobieństwa Froude'a:  $2 \leq Fr \leq 97,4$ .

## Wnioski

♦ W stożkowych regulatorach wirowych wyróżnić można dwa rodzaje przepływów, tj. niewirowe i wirowe. Na granicy tych ruchów – w obszarze histerezy – współczynnik przepływu ( $\mu$ ) przyjmuje dwie wartości – maksymalną w ruchu niewirowym oraz minimalną w ruchu wirowym (wartość współczynnika oporu ( $\zeta$ ) regulatora stożkowego w ruchu wirowym jest znacznie większa niż w ruchu niewirowym).

♦ W ruchu wirowym wartość współczynnika przepływu ( $\mu$ ) osiąga w przybliżeniu wartość stałą powyżej granicznych wartości liczby Froude'a ( $Fr > 2$ ) oraz Reynoldsa ( $Re > 50$  tys.), tj. poza obszarem histerezy charakterystyki hydraulicznej regulatora.

♦ Do zwiększenia wartości współczynnika przepływu (w ruchu wirowym) dochodzi wraz ze wzrostem względnej średnicy króćca wylotowego ( $d_2/d_1$ ), jak i względnej wysokości komory wirowej ( $h_c/d_1$ ), a także kąta wejścia króćca wlotowego ( $\theta$ ), natomiast wzrost względnej średnicy komory wirowej ( $D/d_1$ ), jak i względnego promienia zawirowania ( $R_o/d_1$ ) prowadzi do zmniejszenia wartości  $\mu$ . Wartość współczynnika przepływu przy  $R_o/d_1 > 2,5$  (wówczas  $D/d_1 > 6,0$ ) jest w przybliżeniu stała.

♦ Stała regulatora ( $K$ ) opisuje łączny wpływ bezwymiarowych parametrów  $d_2/d_1$ ,  $R_o/d_1$  i  $\cos \theta$  na wartość współczynnika  $\mu$  i zwiększa dokładność ilościowego opisu działania urządzenia. Wraz ze wzrostem wartości  $K$  maleje wartość  $\mu$ .

♦ Wartości współczynnika przepływu ( $\mu$ ) uzyskane w przypadku badanych modeli regulatorów wirowych zawierają się w granicach od 0,068 do 0,497 (w przeliczeniu na wartości współczynnika oporów miejscowych ( $\zeta$ ) wynosi odpowiednio od 216 do 4). Obliczane w powyższym zakresie wartości  $\mu$  ze wzoru (10) mogą być obciążone średnim błędem kwadratowym  $< 6\%$ .

♦ Ze względu na maksymalizację skuteczności dławienia przepływu cieczy ( $Fr \geq 2$ ) racjonalna jest mała wysokość stożkowej komory wirowej  $h_c/d_1 < 3$ , przy stosunku  $D/d_1 < 6$  i kącie  $\theta \leq 30^\circ$  oraz relacji średnic  $d_2 \geq d_1$  związanej z koniecznością zachowania warunku tzw. wolnego przelotu kuli.

♦ Ustalone w pracy wzory empiryczne umożliwiają ocenę wpływu parametrów konstrukcyjnych stożkowych regulatorów hydrodynamicznych na wartość współczynnika przepływu,

a tym samym umożliwiają optymalny ich dobór do konkretnych zastosowań praktycznych, zwłaszcza w inżynierii środowiska.

*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: Vorrichtung zur Behinderung des Rückströmens [Ed. D. REICH], 1928.
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. L.W. MAYS: Stormwater Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill, 2001.
5. A. KOTOWSKI, P. WÓJTOWICZ: Podstawy projektowania i zasady stosowania regulatorów wirowych przepływu cieczy w systemach wodociagowych i kanalizacyjnych. Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wrocław 2008 (praca niepublikowana).
6. H. BROMBACH: Bistable vortex throttles for sewer flow control. Proc. of IFAC Symp. "Pneumatic & Hydraulic Components", Warsaw 1980, pp. 109–113.
7. H. BROMBACH: Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart 1974.
8. Y.-E. ELALFY: Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdioden und Drosseln. Ph.D. Thesis, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart 1979.
9. U. SANFILIPPO, A. PAOLETTI, R. PACHECO: A comparison between physical and mathematical models of vortex amplifiers. Proc. of XXVth Congress of the IAHR, London 1995, pp. 96–101.
10. V. TESAR: Superquadratic behaviour of vortex diodes. Proc. of IFAC Symp. "Pneumatic and Hydraulic Components", Warsaw 1980, pp. 79–95.
11. H. BROMBACH: Vortex devices in hydraulic engineering. Proc. of 5th Cranfield Fluidic Conference, BHRA, Fluid Engineering, Cranfield, Bedford 1972.
12. H. NEUMAYER: Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern. Ph.D. Thesis, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart, Stuttgart 1976.
13. 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.
14. P. WÓJTOWICZ: Wpływ parametrów konstrukcyjnych i eksploatacyjnych wybranych regulatorów wirowych na ich charakterystykę hydrauliczną. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Wrocław 2007 (praca niepublikowana).
15. F. EBERT: Zur turbulenten Durchströmung einer flachen kreiszylindrischen Kammer. *Acta Mechanica* 1977, 25, pp. 241–256.
16. P. WÓJTOWICZ, A. KOTOWSKI: Badania modelowe cylindrycznych regulatorów hydrodynamicznych. *Ochrona Środowiska* 2008, vol. 30, nr 2, ss. 35–41.

**Wójtowicz, P., Kotowski, A. Model Testing of Conical Vortex Flow Hydrodynamic Regulators. *Ochrona Srodowiska* 2008, Vol. 30, No. 3, pp. 37–44.**

**Abstract:** Upon analysis of the state-of-the-art in the field of vortex flow hydrodynamic devices, a model testing technology has been developed for conical vortex flow regulators designed for application mainly in water and wastewater treatment systems. Presented are examples of results referring to the effect of the geometrical parameters of the conical vortex chamber (spatial orientation, diameter of inlet connector pipe, diameter of outlet opening, spray cone angle) on the flow characteristics of the regulator. It has been demonstrated that the functional relations examined enable a rational choice of the construction parameters

for a conical regulator and that the inclusion of an additional operational parameter, namely the spray cone angle, upgrades the accuracy of the quantitative description of the discharge coefficient for the conical flow regulators examined. With the empirical formulae derived for the purpose of the study it is possible to establish how the construction parameters of hydrodynamic conical regulators affect the value of the discharge coefficient. And this enables an optimal choice of these parameters (because of the throttling effect) for practical use, particularly in environmental engineering.

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