

Przepływowy model instalacji dystrybuowania kwasu siarkowego

Flow model of the sulfuric acid distribution installation

STANISŁAW GIL, MARIUSZ WNĘK, ROBERT ŁUDZIEN

W publikacji zaprezentowano przepływowy model instalacji napełniania cystern kolejowym kwasem siarkowym (VI). W modelowaniu matematycznym procesu przepływu w instalacji przemysłowej wykorzystano schemat modelu obiektu oraz eksperymenty przeprowadzone w trakcie pracy instalacji. Analiza wyników poszczególnych serii eksperymentów wykazała nietypowy kształt charakterystyk strumienia masy w funkcji stopnia otwarcia zaworu (zbyt szeroka histereza), znacznie odbiegających od typowych charakterystyk przepływowych podawanych w normach i literaturze. Do opisu podstawowej charakterystyki przepływowej posłużono się charakterystyką współczynnika przepływu podaną przez producenta armatury. W wyniku modelowania przepływu w instalacji kwasu siarkowego zaprezentowano charakterystykę o pożądanym kształcie, jaki powinien być uzyskany ze wskazań układu pomiarowego, gdyby nie był on obciążony błędem bezwładności.

Słowa kluczowe: kwas siarkowy, model przepływowy

The publication presents a flow model of a tank filling installation for sulfuric acid (VI). In mathematical modelling of the flow process in an industrial installation, the model of the object was used and experiments carried out during the operation of the installation. Analysis of the results of individual series of experiments showed unusual shape of mass flow characteristics as a function of valve opening degree (too wide hysteresis), significantly different from typical flow characteristics given in standards and literature. To describe the basic flow characteristics the flow rate characteristic given by the valve manufacturer was used. As a result of flow modelling in the sulfuric acid installation the characteristic of desired shape was presented, which should be obtained from the indications of the measurement system if it was not subject to the inertia error.

Keywords: sulfuric acid (VI), flow model

Wprowadzenie

Przepływy różnego rodzaju płynów występują w prawie każdym procesie produkcyjnym. Wymagają one często ostrożnej kontroli charakteru przepływu, pomiaru strumienia oraz regulacji. Jest to szczególnie ważne w tych przypadkach, kiedy transportowanym płynem jest ciecz o szkodliwym oddziaływaniu na środowisko. Od systemów regulacji przepływu wymaga się utrzymania stałej wartości strumienia, a także możliwości dokonywania płynnych jego zmian, kiedy instalacja działa okresowo, jak to ma miejsce w przypadku urządzeń służących do napełniania zbiorników.

Przy dławieniowej regulacji przepływu, z wykorzystaniem zaworów, mogą występować znaczne problemy z jakością regulacji, zwłaszcza w początkowych stadiach otwarcia zaworu. Ponadto podczas otwierania i domykania zaworu mogą pojawiać się takie niekorzystne zjawiska, jak uderzenia hydrauliczne czy pulsacje

ciśnienia o destrukcyjnym oddziaływaniu na armaturę i elektroniczną aparaturę kontrolno-pomiarową [1-2]. Istotą problemu jest właściwe sterowanie strumieniem płynu podczas całego czasu trwania przepływu, a zwłaszcza w jego fazie początkowej i końcowej oraz podczas przerw spowodowanych sytuacjami awaryjnymi. Dotyczy to uzyskania stosunkowo krótkiego czasu trwania tych faz przy jednoczesnym zapewnieniu stabilnego przepływu oraz wyeliminowaniu niekorzystnych zjawisk [1, 3-6], jakie mogą występować przy zbyt szybkim otwieraniu i domykaniu zaworu sterującego. Problem jest szczególnie istotny, jeżeli transportowanym płynem technologicznym jest ciecz o szkodliwym oddziaływaniu na środowisko.

Celem poniższej publikacji było przedstawienie opracowanego przepływowego modelu instalacji napełniania cystern kolejowych kwasem siarkowym (VI) oraz zaprezentowanie charakterystyki przepływowej o pożądanym kształcie, jaki powi-

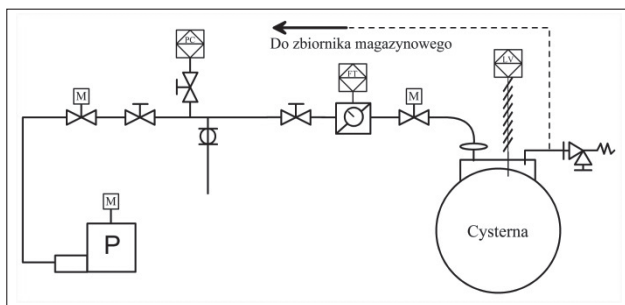
nien być uzyskany ze wskazań układu pomiarowego, gdyby nie był on obciążony błędem bezwładności.

Badania eksperymentalne

Stacja napełniania cystern kolejowych posiada sześć stanowisk nalewczyczych, które znajdują się na podeście załadunkowym. Każde ze stanowisk wyposażone jest w głowicę nalewczą oraz węże doprowadzające do niej kwas siarkowy (VI). Głowica jest podwieszona na żurawiku i połączona z instalacją rurociągową zasilaającą nalewaki. Każdy nalewak zawiera następujące elementy: zawór ręczny, przepływomierz indukcyjny oraz zawór odcinający z aktuatorem elektrycznym sterowanym sygnałem z konsoli operatorskiej. Instalacja rurociągową od króćca tłoczni pionowej pompy zasilającej do węży nalewczyczych wykonana jest ze stali kwasoodpornej, natomiast same węże wykonane są z materiału kompozytowego. Nalewaki

dr hab. inż. Stanisław Gil, prof. P.Śl., do kontaktu e-mail: Stanislaw.Gil@polsl.pl, dr inż. Mariusz Wnęk – Instytut Technologii Metali, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Politechnika Śląska, Katowice
mgr inż. Robert Łudzień – Auma Polska Sp. z o.o.

zasilane są pompą pionową zanurzoną w zbiorniku pompowym. Kwas doprowadzany jest rurociągiem do kolektora zlokalizowanego pod podestem nalewczym. W najwyższej położonym punkcie rurociągu umieszczono zawór odpowietrzający. Od kolektora odchodzą przewody rurowe do każdego z nalewaków. Kolektor w najniższym punkcie ma zamontowany zawór spustowy z latarką kontrolną. Nominalne natężenie przepływu kwasu do każdego z nalewaków wynosi 30 m³/h. Jego maksymalne ciśnienie robocze wynosi ok. 2·10⁵ Pa. Na rys. 1 przedstawiono schemat technologiczny instalacji dla nalewaka, na którym prowadzono eksperymenty. Odcinek ten jest odcinkiem reprezentatywnym dla całej instalacji, ponieważ pozostałe nalewaki były zbudowane w identyczny sposób.



Rys. 1. Schemat technologiczny nalewaki kwasu siarkowego (VI)
Fig. 1 Technological diagram of pourers of sulfuric acid (VI)

Powietrze wypierane przez kwas z wnętrza cysterny jest odprowadzane rurociągiem do zbiornika pompowego. Wewnątrz cysterny utrzymywane jest ciśnienie nieco niższe od ciśnienia kwasu dopływającego do głowicy nalewczej.

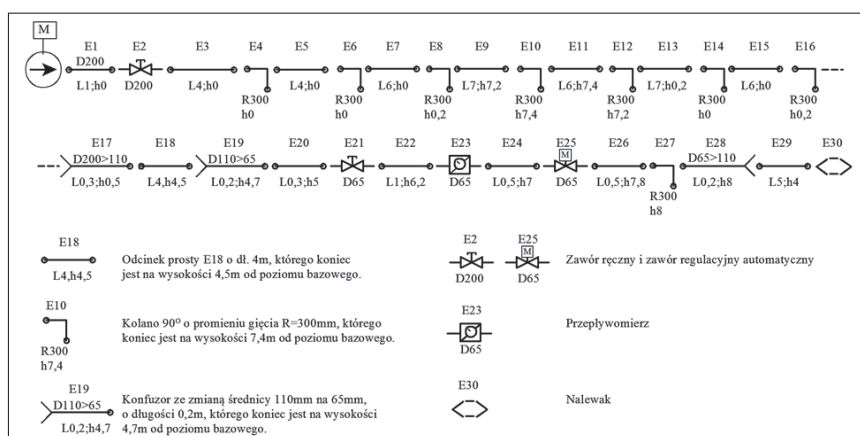
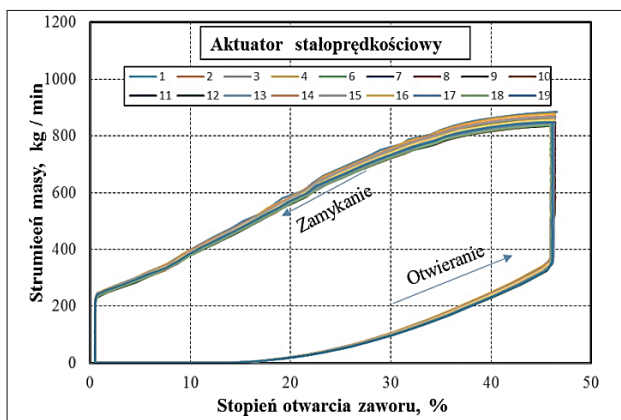
W zależności od pory roku rozróżnia się dwa typy kwasu ze względu na stężenie – letni i zimowy. Kwas letni charakteryzuje się następującymi właściwościami: stężenie 96 %, gęstość 1835 kg/m³ (w temperaturze 20°C), lepkość 22,9 mPa s. Natomiast kwas zimowy następującymi: stężenie (92–93) % w temperaturze 5 °C, gęstość ok. 1840 kg/m³ i lepkość 40,3 mPa s. Podczas badań wykorzystano aktuator stałoprędkościowy model Auma SGR 07.1. Mierzone parametry: czas w ms, stopień otwarcia zaworu w % oraz strumień kwasu siarkowego (VI) w kg/min i w %, były rejestrowane przez system komputerowy. W celu rejestracji i magazynowania danych opracowano program „Omron”, który został napisany w Visual Studio 6.0. Program współpracował poprzez port szeregowy COM1 z programowalnym sterownikiem OMRON NS10-TV01B-V2 zarządzającym procesem nalewania kwasu. Ze względów bezpieczeństwa dla substancji niebezpiecznych ustala się zwykle przepływy przy niskich ciśnieniach oraz

nie stosuje się pełnego otwarcia zaworu regulacyjnego. Maksymalny stopień otwarcia zaworu został nastawiony programowo na ok. 50 %. Sensor pomiarowy przepływomierza PROMAG 50P umożliwił rejestrację wyników pomiaru ze średnim czasem próbkowania 111 ms. Przeprowadzono 19 eksperymentów. Podczas każdego eksperymentu zebrano dane zawierające do ponad 600 wartości mierzonych.

Na rys. 2 zaprezentowano wyniki 19 eksperymentów zależności strumienia masy od stopnia otwarcia zaworu, które wykonano w celu sprawdzenia powtarzalności wyników. Charakterystyki te zostały uzyskane dla następującej procedury pomiarowej – przejście zaworu od stopnia otwarcia od 0 % do ok. 45 %, zatrzymanie na ok. 40 s i zamknięcie do 0 % oraz ponowne zatrzymanie na ok. 40 s. Zaob-

serwowano nietypowy kształt zarejestrowanych charakterystyk (szeroka histereza), które znacznie odbiegały od charakterystyk przepływowych podawanych w normach i literaturze [7-9]. Podobnie szerokie histerezy zarejestrowali również Cui i inni [10]. Badali oni wpływ procesu otwierania i zamykania zaworu kulowego na wydajność i wewnętrzną charakterystykę przepływu. Badacze ci nie skomentowali tych nietypowych charakterystyk, skupili się tylko na analizie zmian ciśnienia przed i za zaworem oraz na zawirowaniach w tym obszarze. Przedstawiony zbiór charakterystyk świadczy o nieodpowiednim dopasowaniu prędkości działania aktuatora i dynamiki układu pomiaru strumienia płynu. Na podstawie kart katalogowych zaworu regulacyjnego zamontowanego w instalacji badawczej można zauważyć, że kąt martwy wynosi ok. 11° (12,2 %) i dopiero po przekroczeniu tej wartości następuje przepływ czynnika. Z analizy rys. 2 wynika, że w procedurze otwierania przepływ następuje dopiero od ok. stopnia otwarcia 15 %, jednakże fakt ten w ogóle nie potwierdza się w procedurze zamykania. Można zauważyć, że po przekroczeniu kąta martwego 11° w procedurze zamykania nadal rejestrowany jest przepływ, który fizycznie już nie istnieje,

Rys. 2. Strumień masy w funkcji stopnia otwarcia zaworu
Fig. 2. Mass flow as a function of valve opening



Rys. 3. Schemat modelowy wybranej ścieżki instalacji dystrybuowania kwasu siarkowego
Fig. 3. Diagram of the selected path of the sulfuric acid distribution plant

gdyż zawór jest zamknięty. Ta sytuacja wyraźnie wykazuje, jak bezwładność układu pomiarowego znacząco wpływa na otrzymywane dane pomiarowe i proces prowadzenia właściwego sterowania w celu zapewnienia prawidłowej regulacji parametru przepływowego.

Model przepływowy instalacji

W celu przygotowania modelu matematycznego układu sporządzono schemat modelowy wybranej ścieżki (rys. 1), który przedstawiono na rys. 3.

Biorąc pod uwagę rodzaj płynu, wielkość i lokalizację instalacji, dla określania strat ciśnienia założono, że płyn jest nieściśliwy, a zmiany gęstości, bądź ciężaru właściwego nie mają praktycznego znaczenia. W wyniku zainstalowania na pompie falownika z układem regulacyjnym utrzymywane jest stałe ciśnienie manometryczne źródła na poziomie ok. 2 barów, bez względu na wydajność procesu. Ciśnienie manometryczne zbiornika transportowego ma wartość niezmienną w całym zakresie wydajności układu dystrybucji i wynosi ok. 0,1 bara. Zawór regulacyjny działa w zakresie od 0 % do ok. 45 % stopnia otwarcia. Maksymalny strumień masowy zarejestrowany podczas badań (przy maksymalnym otwarciu zaworu nastawczego) wynosił 857 kg/min.

W każdym z elementów wchodzących w skład armatury występują straty ciśnienia związane z przepływem, jednakże rozpatrywane jako całość stanowią sumę strat ciśnienia, co opisane jest jako charakterystyka sieci

$$\Delta p_s = f(m), \quad (1)$$

gdzie:

Δp_s – suma strat ciśnienia w sieci, Pa,
 m – strumień masowy, kg/s.

Źródło, jakim może być pompa, wentylator lub regulator ciśnienia (p_z) posiada własną charakterystykę przepływową definiowaną, jako

$$p_z = f(m) \quad (2)$$

i musi być tak dobrane, aby pokryć zapotrzebowanie na straty ciśnienia występujące w instalacji i zapewnić technologiczną wydajność, czyli musi być spełniona zależność

$$p_z(m) = \Delta p_s(m) + \Delta p_N f(m) + p_{odb} \quad (3)$$

gdzie:

Δp_N – spadek ciśnienia na elemencie nastawczym, Pa,
 p_{odb} – ciśnienie odbiornika, Pa.

Obowiązującym modelem układu instalacji jest zależność (3), w którym należy określić poszczególne człony.

Na podstawie otrzymanej podstawowej charakterystyki przepływowej, danych pomiarowych i założeń wyrowadzono równanie (4) umożliwiające obliczenie spadku ciśnienia w elemencie nastawczym przy maksymalnym przepływie, które stanowi podstawę do rozwiązania układu równań opisujących straty ciśnienia w poszczególnych elementach sieci. Składnik równania f_{aprox} jest funkcją aproksymującą charakterystykę przepływową zaworu regulacyjnego

$$\Delta p_N(\dot{m}_{max}, \varphi) = \left(\frac{\dot{m}_{max}}{A_N \varepsilon} \right)^2 \frac{1}{D_1^2 D_2^2 \rho} f_{aprox}, \quad (4)$$

gdzie:

\dot{m}_{max} – maksymalny strumień masowy, kg/h,
 A_N – nominalne pole powierzchni przepływowej zaworu, m²,
 ε – liczba ekspansji, – ,
 D_1 – współczynnik liczbowy ($D_1 = 0,101$ s/m),
 D_2 – współczynnik liczbowy ($D_2 = 25,45 \cdot 10^8$ m²/h²),
 ρ – gęstość płynu, kg/m³,

Oszacowana na podstawie tej zależności wartość spadku ciśnienia w zaworze regulacyjnym dla maksymalnego przepływu wynosi ok. 30,26 kPa.

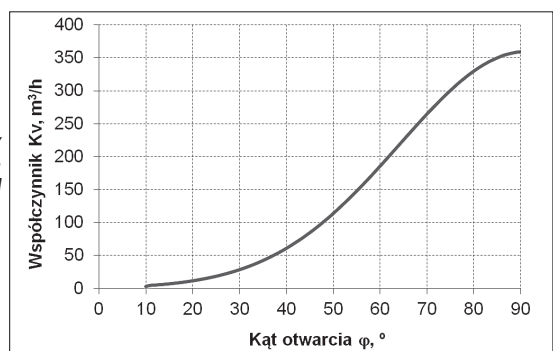
Jako charakterystykę źródła p_z przyjęto ogólne równanie kwadratowe

$$p_z = -a_1 m^2 + b_1 m + c_1. \quad (5)$$

W przypadku rozważanej instalacji źródło stanowi pompa wyposażona w regulator ciśnienia, czyli jej charakterystyka jest stałowartościowa, zatem współczynniki a_1 i b_1 są zerowe a $c_1 = 200$ kPa.

Zgodnie ze schematem modelowym instalacji (rys. 3) charakterystyka sieci składa się z sumy charakterystyk poszczególnych elementów armaturowych. Dla każdego z tych elementów spełnione jest równanie ciągłości strugi oraz równanie Bernoulliego odniesione do dwóch przekrojów wejściowego – 1 i wyjściowego – 2

Rys. 4. Charakterystyka współczynnika przepływu w funkcji kąta otwarcia dla zaworu regulacyjnego instalacji dystrybucji kwasu siarkowego
Fig. 4. Characteristics of the flow coefficient as a function of the opening control valve for the sulfuric acid distribution system



$$\alpha \frac{\rho w_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \alpha \frac{\rho w_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{str_{1-2}}, \quad (6)$$

gdzie:

α – współczynnik Saint-Venanta (z przyjętych założeń przyjmuje wartość $\alpha = 1$),
 w_1, w_2 – prędkość płynu w przekrojach 1 i 2, m/s,
 p_1, p_2 – ciśnienie płynu w przekrojach 1 i 2, Pa,
 g – przyspieszenie ziemskie, m/s²,
 z_1, z_2 – wysokość położenia (od poziomu odniesienia) elementów armaturowych w przekrojach 1 i 2, m,
 $\Delta p_{str_{1-2}}$ – straty ciśnienia pomiędzy przekrojami 1 i 2, Pa.

W każdym z elementów armatury uwzględniane są opory przepływu, od których zależą straty ciśnienia. Dla rur hydraulicznie gładkich i dla liczby Reynoldsa $Re > 4000$ oraz względnej chropowatości rury $e \leq e_{gran}$, współczynnik tarcia λ można obliczać z zależności Prandtla – Karmana [11,12]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{\sqrt{\lambda} Re}{2,51}. \quad (7)$$

Na podstawie kart katalogowych zaworu regulacyjnego zainstalowanego w badanej instalacji dystrybucji kwasu siarkowego (zawór kulowy NTC PN16 z kulą typu C) opracowano zależność $K_V(\varphi)$, którą przedstawiono w postaci wykresu na rys. 4.

Wykorzystując powyższą charakterystykę przepływową oraz powiązanie $K_V(\varphi)$ z liczbą lokalnego oporu $Z_N(\varphi)$ opracowano równanie podstawowej charakterystyki przepływowej analizowanego zaworu (zależność 8), które wyznaczono metodą regresji ze współczynnikiem determinacji $R^2 = 0,999$

$$Z_N(\varphi) = \alpha \varphi^b e^{-c\varphi}, \quad (8)$$

gdzie:

$\alpha = 88954$ (°)^{1,2},

$$b = -1,2,$$

$$c = 1,23 \cdot 10^{-1} \text{ 1/}^\circ.$$

Dla przepływów turbulentnych strumień \dot{m} płynu przepływającego przez zawór opisuje równanie uwzględniające zmiany współczynnika przepływu

$$\dot{m} = D_1 K_V(\varphi) \varepsilon \sqrt{\Delta p_N \rho}. \quad (9)$$

Zgodnie z przyjętymi założeniami dla pierwszego elementu armaturowego (E1), ograniczonego przekrojami kontrolnymi 1 i 2 (rys. 3), dla danego kąta otwarcia ϕ zaworu regulacyjnego, należy określić parametry wyjścia w przekroju kontrolnym 2, które są z kolei parametrami wejściowymi dla kolejnego elementu (E2)

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 \cdot w_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 \\ \frac{\rho w_1^2}{2} + p_1 + \rho g z_1 = \\ = \frac{\rho w_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 + \Delta p_{str_{1-2}} \\ \Delta p_{str_{1-2}} = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho w_1^2}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log(\sqrt{\lambda} Re) \end{array} \right. \quad (10)$$

gdzie:

L – długość rurociągu, m,
 d – średnica rurociągu, m.

Następnie dla drugiego elementu armaturowego (E2), którym jest klapowy zawór międzykolnierzowy, należy rozwiązać układ równań

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 \cdot w_2 \cdot \rho_2 = A_3 \cdot w_3 \cdot \rho_3 \\ \frac{\rho w_2^2}{2} + p_2 + \rho g z_2 = \\ = \frac{\rho w_3^2}{2} + p_3 + \rho g z_3 + \Delta p_{str_{2-3}} \\ K_V(\varphi) = A_N \sqrt{\frac{D_2}{Z_N(\varphi)}} \\ \Delta p_{str_{2-3}} = \left(\frac{9,9 \text{ m}}{K_V(\varphi) \varepsilon} \right)^2 \frac{1}{\rho} \end{array} \right. \quad (11)$$

gdzie wartość 9,9 ma wymiar m/s.

Element trzeci (E3) i pozostałe proste odcinki armaturowe są opisane przez równania (10), przy czym współczynnik tarcia λ jest wyznaczany zgodnie z normą [11] w zależności od charakteru przepływu określonego przez liczbę Reynoldsa.

Element czwarty (E4), którym jest kolano 90° o danym promieniu gięcia (dla $R/d > 1,5$ i rur gładkich) jest opisany przez układ równań

$$\left\{ \begin{array}{l} A_4 \cdot w_4 \cdot \rho_4 = A_5 \cdot w_5 \cdot \rho_5 \\ \frac{\rho w_4^2}{2} + p_4 + \rho g z_4 = \\ = \frac{\rho w_5^2}{2} + p_5 + \rho g z_5 + \Delta p_{str_{4-5}} \\ \Delta p_{str_{4-5}} = \\ = \left(0,0175 \lambda \frac{R}{d} \alpha + 0,21 \sqrt{\frac{d}{R}} \right) \frac{\rho w_4^2}{2} \end{array} \right. \quad (12)$$

gdzie R i α określa się zgodnie z normą [11].

Dla kolanek 90° przy $R/d > 1,5$ i rur chropowatych spadek ciśnienia jest określony przez zależność

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta p_{str_{A-3}} = \\ = \left(0,0175 \lambda \frac{R}{d} \alpha + 0,21 \sqrt{\frac{d}{R}} \right) \frac{\rho w_E^2}{2} \end{array} \right. \quad (13)$$

prze znormalizowanymi wartościami parametru C określonymi w [11] dla kolanek giętych $0^\circ < \alpha < 180^\circ$.

Konfuzor stożkowy (E17 i E19) opisuje następujący układ równań

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{17} \cdot w_{17} \cdot \rho_{17} = A_{18} \cdot w_{18} \cdot \rho_{18} \\ \frac{\rho w_{17}^2}{2} + p_{17} + \rho g z_{17} = \\ = \frac{\rho w_{18}^2}{2} + p_{18} + \rho g z_{18} + \Delta p_{str_{17-18}} \\ \Delta p_{str_{17-18}} = \\ = \frac{\lambda l}{4d} \left[1 + \frac{D}{d} + \left(\frac{D}{d} \right)^2 + \left(\frac{D}{d} \right)^3 \right] \frac{\rho w_{17}^2}{2} \end{array} \right. \quad (14)$$

gdzie d , D i l definiuje się wg normy [11].

Dyfuzor stożkowy dla $0^\circ < \alpha < 40^\circ$ (element E28) jest opisany przez układ równań

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{28} \cdot w_{28} \cdot \rho_{28} = A_{29} \cdot w_{29} \cdot \rho_{29} \\ \frac{\rho w_{28}^2}{2} + p_{28} + \rho g z_{28} = \\ = \frac{\rho w_{29}^2}{2} + p_{29} + \rho g z_{29} + \Delta p_{str_{28-29}} \\ \Delta p_{str_{28-29}} = 3,2 \text{tg} \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \left[1 - \frac{d^2}{D^2} \right] \\ + \frac{\lambda}{8 \sin \alpha} \left[1 - \left(\frac{d^2}{D^2} \right)^2 \right] \end{array} \right. \quad (15)$$

Równania opisujące poszczególne elementy sieci technologicznej rozwiązują się przy danym stopniu otwarcia zaworu regulacyjnego. Na podstawie uzyskanych wyników dla danego kąta ϕ można wyznaczyć charakterystykę sieci n -elementowej według zależności

$$\Delta p_S(\varphi) = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta p(m)_{str_{i(i-1)}} \quad (16)$$

Dysponując zdefiniowanymi charakterystykami składowymi, tworzącymi charakterystykę roboczą, należy mieć na uwadze, że ostatecznie musi być spełniona zależność (3).

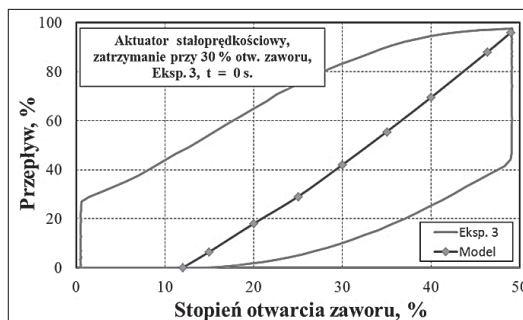
Wyniki modelowania przepływu w instalacji kwasu siarkowego

W modelowaniu matematycznym procesu przepływu w instalacji przemysłowej wykorzystano schemat modelowy zamieszczony na rys. 3. Do opisu podstawowej charakterystyki przepływowej posłużono się charakterystyką producenta $K_V(\varphi)$ (rys. 4) aproksymowaną równaniem (8).

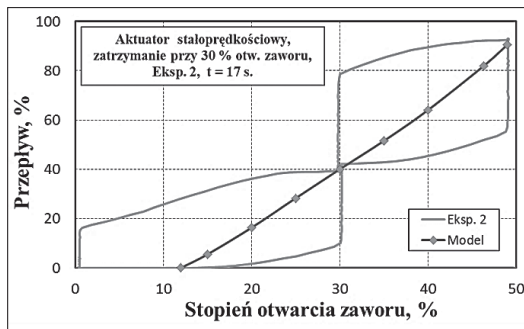
W skład instalacji kwasu siarkowego (rys. 3) wchodzi następujące elementy armaturowe: odcinki proste, kolanka 90°, konfuzory, dyfuzor, zawory ręczne, automatyczny zawór regulacyjny oraz przepływomierz. Model matematyczny rozwiązanej instalacji zaprezentowano powyżej.

Obliczenia wykonano dla następujących wielkości wejściowych: własności płynu, ciśnienie źródła (pompy) oraz ciśnienie odbiornika (cysterna z zaworem bezpieczeństwa). Dla rozwiązanej instalacji najbardziej problematyczne było określenie współczynników oporów liniowych.

Na rys. 5 przedstawiono charakterystykę przepływową zaworu kulowego sterowanego aktuatorem stałoprędkościowym wg procedury (O/Z). Kształt tej charakterystyki przyjmuje omawianą już postać „skrzydła”, która nie jest właściwa dla układu sterowania i znacząco utrudnia prowadzenie regulacji. Dla porównania na rysunku zamieszczono również charakterystykę otrzymaną w wyniku modelowania. Przedstawia ona pożądaną przebieg, jaki powinien być rejestrowany w przypadku układu rzeczywistego, gdyby nie był on obciążony znaczną bezwładnością układu pomiaru strumienia płynu.



Rys. 5. Charakterystyka przepływowa zaworu z aktuatorem stałoprędkościowym wg procedury (O/Z) wraz z przepływową charakterystyką modelową Fig. 5. Flow characteristics of a valve with a constant speed actuator according to the procedure (O/Z) together with a modeled characteristic



Rys. 6. Charakterystyka przepływowa zaworu z aktuatorem stałoprędkościowym wg procedury (O/Z)Stop wraz z przepływową charakterystyką modelową Fig. 6. Flow characteristics of a valve with a constant speed actuator according to the procedure (O/Z)Stop together with a modeled characteristic

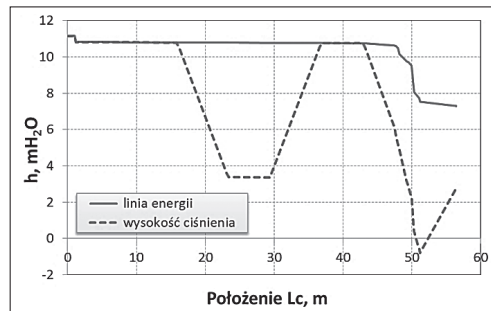
zamiana aktuatora stałoprędkościowego na zmiennoprędkościowy znacząco poprawiłoby kształt charakterystyki przepływowej zaworu regulacyjnego.

- Właściwa charakterystyka przepływowa uzyskana z modelowania lub odpowiedniego dobrania napędu i układu pomiarowego strumienia płynu wpływa korzystnie na jakość regulacji, eliminując między innymi tzw. zjawisko pompowania.

Na rys. 6 przedstawiono charakterystykę przepływową zaworu kulowego sterowanego aktuatorem stałoprędkościowym wg procedur (O/Z)Stop. Ruch zaworu zatrzymywano przy stopniu otwarcia zaworu 30% na okres 17 s. Zatrzymania dokonywano zarówno podczas operacji otwierania jak i zamykania zaworu. Można zaobserwować, że zatrzymanie ruchu zaworu w procedurze otwierania powoduje wzrost wartości odczytu przepływu, a w procedurze zamykania – spadek. Obydwie te wartości „zbliżają się do siebie”, a dokładnie do wartości rzeczywistej, która powinna być wskazywana, gdyby w układzie pomiarowym strumienia płynu nie występowała bezwładność. Takie wartości są pożądane dla układu sterowania, gdyż wpływają korzystnie na jakość regulacji, eliminując między innymi tzw. zjawisko pompowania. Dla porównania na rys. 6 zamieszczono również charakterystykę przepływową uzyskaną w wyniku modelowania. Charakterystyka ta jest bezinercyjna i prezentuje wartości, które w rozważanym rzeczywistym układzie mogą być uzyskane tylko w stanach ustalonych, dla poszczególnych stopni otwarcia zaworu. Jak można zauważyć zatrzymanie zaworu w omawianej procedurze powoduje wskazanie wartości z charakterystyki modelowej.

Rys. 7 przedstawia linie energii i wysokości ciśnienia dla stopnia otwarcia zaworu regulacyjnego 49% według charakterystyki modelowej z rys. 5. Charakterystyki te wynikają z równania Bernoulliego będącego miarą energii mechanicznej (wyrażonej w jednostkach wysokości słupa cieczy) dla strumienia przepływającego płynu. Charakterystyki te są częścią matematycznego opisu modeli technologicznych układów przepływowych. Przedstawiona linia energii została określona dla cieczy rzeczywistej, w której uwzględniono w modelu straty ciśnienia (6). Straty te dla płynów rzeczywistych są dwójakiego rodzaju: straty lokalne (zmiana kształtu geometrycznego przewodu np. zawory, kolanka, przewężenie) i straty tarcia (lepkość cieczy, rodzaj przepływu i gładkość przewodu). Natomiast charakterystyka zaprezentowana, jako wysokość ciśnienia stanowi wartościowo stosunek ciśnienia statycznego do iloczynu gęstości płynu i przyspieszenia ziem-

Rys. 7. Linia energii i wysokość ciśnienia dla przepływu kwasu siarkowego przez instalację przy 49% stopniu otwarcia zaworu regulacyjnego Fig. 7. The energy line and the pressure height for the flow of sulfuric acid through the installation at a 49% of opening of the control valve



skiego. Linia wysokości ciśnienia jest przesunięta względem linii energii o czynnik zwany wysokością prędkości $w^2/2g$ (6).

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stanowiskowych i modelowania wyciągnięto następujące wnioski:

- Analiza wyników serii eksperymentów wykazała nietypowy kształt charakterystyk strumienia masy kwasu siarkowego (VI) w funkcji stopnia otwarcia zaworu (zbyt szeroka histereza), znacznie odbiegający od typowych charakterystyk przepływowych podawanych w normach i literaturze, który świadczy o nieodpowiednim dopasowaniu prędkości działania aktuatora i dynamiki układu pomiaru strumienia płynu.
- W wyniku modelowania przepływu w instalacji kwasu siarkowego zaprezentowano charakterystykę o pożądanym kształcie, jaki powinien być uzyskany ze wskazań układu pomiarowego, gdyby nie był on obciążony błędem bezwładności.
- Charakterystyki opisane jako linie energii i wysokość ciśnienia wynikają z równania Bernoulliego będącego miarą energii mechanicznej (wyrażonej w jednostkach wysokości słupa cieczy) dla strumienia przepływającego płynu i są częścią matematycznego opisu modeli technologicznych układów przepływowych.
- Wprowadzenie chwilowych zatrzymań napędu (rys. 6) znacząco przybliżyła wskazania przepływu dla przebiegu otwierania i zamykania zaworu, aż do ich wyrównania. Zastosowanie szybkiego w działaniu przetwornika pomiarowego w przepływomierzu lub

LITERATURA

- [1] Yuan Q., Li P.: Using steady flow force for unstable valve design: modeling and experiments. "Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control", Vol. 127, 2005, 451-462.
- [2] Rogula J.: The Influence of Seat Fatigue Test on the Leakage in Ball Valve. "Procedia Engineering", Vol. 39, 2012, 91-97.
- [3] Amirante R., Del Vecovo G., Lippolis A.: Evaluation of the flow forces on an open centre directional control valve by means of a computational fluid dynamics analysis. "Energy Conversion and Management", Vol. 47, 2006, 1748-1760.
- [4] Amirante R., Moscatelli P.G., Catalano L.A.: Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic analysis. "Energy Conversion and Management", Vol. 48, 2007, 942-953.
- [5] Cho T.D., Yang S.M., Lee H.Y., Ko S.H.: A study on the force balance of an unbalanced globe valve. "Journal of Mechanical Science and Technology", Vol. 21, No. 5, 2007, 814-820.
- [6] Valdés J.R., Rodríguez J.M., Saumell J., Pütz T.: A methodology for the parametric modelling of the flow coefficients and flow rate in hydraulic valves. "Energy Conversion and Management", Vol. 88, 2014, 598-611.
- [7] PN-EN 60534-2-3: Przemysłowe zawory regulacyjne. Wydajność przepływowa. Procedury badań. PKN, Warszawa 2001.
- [8] Tomeczek J., Puszer A., Wnęk M.: Sposób kształtowania regulacyjnych charakterystyk przepływowych elementów nastawczych strumienia płynu. Pomiary Automatyka Kontrola Vol. 53, Nr 11 (2007) 38-43.
- [9] Wiśniowicz A.: Charakterystyki przepływowe armatury odcinającej. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, Nr 4 (2004) 122-124.
- [10] Cui B., Zhe Z., Zhu Z., Wang H., Ma G.: Influence of opening and closing process of ball valve on external performance and internal flow characteristics. Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 80 (2017) 193-202.
- [11] PN-76/M-34034: Rurociągi. Zasady obliczeń strat ciśnienia. PKNiM, Wydawnictwo Normalizacyjne, Warszawa 1977.
- [12] DVWK-ATV-A110: Richtlinien für die hydraulische Dimensionierung und den Leistungsnachweis von Abwasserkanälen und leitungen. Gfa, Hennef 1988. ■