

WYZNACZENIE SIŁY POOSIOWEJ (OPORU) DZIAŁAJĄCEJ NA PRZESŁONĘ ELEMENTU NASTAWCZEGO ZA POMOCĄ WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPŁYWU k_v

Obliczenia inżynierskie wartości sił działających na elementy nastawcze, służące do regulacji przepływu płynu w przewodach zamkniętych, nastroczają poważne trudności. Wynika to z faktu, że przeprowadzenie ich zgodnie z zasadami opracowanymi i usystematyzowanymi w mechanice płynów, nie daje w większości przypadków wystarczającej dokładności dla technicznych obliczeń.

Dlatego poszczególne problemy obliczeniowe przy przepływach płynów rzeczywistych, są rozwiązywane indywidualnie na drodze teoretycznej, teoretyczno-doświadczalnej, lub czysto doświadczalnie – dla bardziej odpowiedzialnych instalacji.

Zależności otrzymywane na drodze teoretycznej mają w większości przypadków, bardzo rozbudowaną postać. Przeprowadzone według nich obliczenia są obciążone dużymi błędami w stosunku do mierzonych wartości sił. Modyfikacja otrzymanych na drodze teoretycznej zależności, poprzez wprowadzenie do nich wyznaczonych doświadczalnie współczynników, prowadzi na ogół do uproszczenia zależności teoretycznych i powiększenia na tyle ich dokładności, że mogą być one stosowane w szerszym zakresie do obliczeń inżynierskich.

Najdokładniejsze wyniki uzyskuje się zazwyczaj przy doświadczalnym wyznaczeniu sił. Nierzadko jednak brak jest możliwości przeprowadzenia ich na obiektach rzeczywistych. W związku z tym, badania są prowadzone na modelach, w których odtworzenie rzeczywistych warunków pracy elementów prowadzi do powstania dodatkowych błędów niezależnie od występujących zawsze błędów pomiaru.

Ważną sprawą jest również wysoki koszt przeprowadzania badań na obiektach rzeczywistych. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że przy dobrej znajomości teorii i praktycznej wiedzy zdobytej w trakcie badań, można na drodze dodatkowo wprowadzonych zależności korekcyjnych, znacznie poprawić dokładność obliczeń opartych na zależnościach teoretycznych. Należy jednak pamiętać, że można również obniżyć dokładność obliczeń z zależności teoretyczno-doświadczalnych, jeśli będą one przeprowadzone dla innego przedziału wartości parametrów fizycznych, niż ten, przy którym wyznaczono doświadczalnie współczynnik lub współczynniki korygujące. Nierzadko bowiem spotyka się zbyt pochopne przyjmowanie wartości uzyskanych na drodze teoretyczno-doświadczalnej bez wyraźnego określenia przedziału ich ważności. W związku z tym, zdarza się, że są one przyjmowane jako obowiązujące w całym przedziale praktycznie stosowanych wartości parametrów fizycznych pomimo, że zostały one sprawdzone tylko w części tego przedziału. Toteż przy korzystaniu z nich, jest wskazane korzystanie z materiałów źródłowych.

W obliczeniach wytrzymałościowych rurociągów przesyłowych jak i instalacji technologicznych, w których zainstalowano elementy nastawcze, zachodzi potrzeba określenia jakie zwiększenie sił powodują te elementy przy różnych nastawach, zmianach parametrów fizycznych płynu i stanach skupienia, w jakim on się znajduje.

W poznanej literaturze dotyczącej elementów nastawczych dla regulacji przepływu płynu, nierozwiązano zagadnienia wyznaczenia sił działających na bryłę o dowolnej konfiguracji podczas jej opływu płynem rzeczywistym w kanałach zamkniętych.

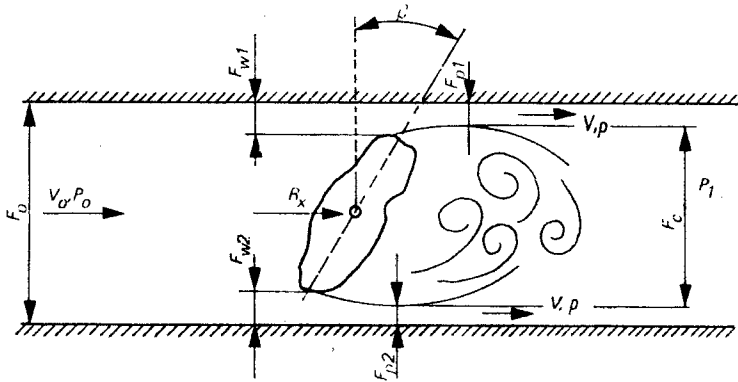
Rozwiązanie dla tak postawionego zadania należy do szczególnie trudnych, zwłaszcza jeśli trzeba je rozpatrywać dla dowolnego płynu rzeczywistego, a uwzględnienie rzeczywistego charakteru opływu w kanale zamkniętym i dodatkowe uwzględnienie w rozwiązaniu dowolnego ukształtowania opływanej bryły, stawia pod znakiem zapytania użyteczność stosowania w obliczeniach inżynierskich rozwiązania teoretycznego.

Stosowane metody obliczeń natężenia przepływu przez elementy nastawcze za pomocą współczynnika k_v oraz stwierdzone ujęcie wpływu rozwiązania konstrukcji i technologii wykonania w module i współczynnika kontrakcji [2], umożliwiły znalezienie rozwiązania. W niniejszym opracowaniu podano rozwiązanie umożliwiające wyznaczenie wartości siły poosiowej (siły oporu) działającej na dowolnie ukształtowaną bryłę opływającą w kanale zamkniętym.

Poprzez celowo zadawane położenie bryły, osiągnąć pożądaną zmiany wolnego przekroju dla przepływu płynu. Rozwiązanie otrzymano na podstawie obliczeń i badań przepustnic regulacyjnych o różnorodnie ukształtowanych klapach. Wykorzystano przy tym materiał z ponad 100 badań różnego rodzaju klap. Sprawdzenie zgodności wartości otrzymanych z zależności przyjętych do wyznaczenia wartości siły poosiowej (oporu) z wartościami mierzonymi przeprowadzono tylko przy przepływie cieczy. Wyznaczenie siły poosiowej (oporu) na ogół jest dokonywane na podstawie zasady zachowania pędu. W otrzymanych w ten sposób zależnościach występuje rzeczywisty przekrój zdławionego strumienia płynu za opływającą bryłę.

Wyznaczenie tego przekroju dla opływu płynem rzeczywistym dowolnych brył w rurociągach, nie ma zadawalającego dla praktyki inżynierskiej rozwiązania.

Na podstawie zaproponowanego przez autora sposobu wyznaczania współczynnika kontrakcji [2], staje się możliwe wyznaczenie przekroju zdławienia strumienia płynu. Rozpatrzono opływ płynem rzeczywistym dowolnie ukształtowanej klapy przepustnicy zainstalowanej w rurociągu (rys. 1).



Rys. 1. Opływ klapy przepustnicy zainstalowanej w rurociągu

Na rysunku oznaczono: F_w – powierzchnia przekroju dla wolnego przepływu $F_w = F_{w1} + F_{w2}$, F_0 – przekrój rurociągu, F_C – przekrój kowerny (obszar zawirowań, intensywnych zaburzeń płynu) powstającej za opływającą klapą, p_0 – średnia wartość ciśnienia płynu przed opływającą bryłą, p – średnia wartość ciśnienia płynu za opływającą bryłą w przewężeniu zadany kowerną, p_1 – średnia wartość ciśnienia za opływającą bryłą w obszarze niezakłóconym oddziaływaniem klapy, V_0 – średnia prędkość strumienia płynu przed opływającą klapą, V – średnia prędkość strumienia płynu; za opływającą bryłą w przewężeniu, R_x – siła poosiowa, m – moduł zadany wymiarami bryły i rurociągu,

$\varphi_0 = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$ – średnia wartość współczynnika kontrakcji, $\Delta p = p_0 - p_1$ – różnica ciśnień przed i za opływającą bryłą.

Stosując zasadę zachowania pędu otrzymuje się następujące równanie

$$\rho V^2 \cdot F_p - \rho V_0^2 \cdot F_0 = (p_0 - p) F_0 - R_x$$

gdzie:

ρ – gęstość przepływającego płynu,

F_p – rzeczywisty przekrój strumienia płynu przy maksymalnym przewężeniu; $F_p = F_{p1} + F_{p2}$

Z zasady zachowania ciągłości przepływu,

ponieważ: $\varphi_0 = \frac{F_p}{F_0}$, a $m = \frac{F_w}{F_0}$

po przekształceniach, otrzymano:

$$R_x = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot F_c (1 - m \cdot \varphi_0) \cdot \frac{1}{m^2 \cdot \varphi_0^2}$$

lub
$$R_x = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot F_0 \left(\frac{1}{m \cdot \varphi_0} - 1 \right)^2$$

gdzie: $F_c = F_0 (1 - m \cdot \varphi_0)$.

Otrzymana zależność jest mało użyteczna ze względu na brak zweryfikowanej inżyniersko zależności pozwalających wyznaczyć współczynnik kontrakcji φ_0 .

Autor zaproponował wyznaczenie współczynnika kontrakcji [2] posługując się rozwiniętą formą zależności na określenie natężenia przepływu przez organy dławiące oraz przyjętej w opisie elementów nastawczych automatyki zależności opisującej natężenie przepływu przez te elementy za pomocą współczynnika k_v .

Otrzymana zależność ma postać:

$$\varphi_0 = \frac{k_v}{m \sqrt{\frac{2F_0^2 \cdot \Delta p}{\rho} + k_v^2}}$$

W zależności na współczynnik kontrakcji wartość k_v jest doświadczalnie określonym współczynnikiem przepływu dla zadanego rozwiązania konstrukcyjnego, bryły-przesłony (służącej do zmian wolnego przekroju dla przepływu) i specyficznych cech technologicznych jej wykonania.

Z definicji k_v jest natężeniem przepływu wody przemysłowej o temperaturze od 4 do 30°C, ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) przepływającej przez element nastawczy przy stałej różnicy ciśnień $\Delta p = p_0 - p_1 = 98,0665 \text{ kPa}$. Określany jest on zazwyczaj dla ściśle określonych wartości modułu m .

W celu weryfikacji uzyskanego na tej drodze rozwiązania opisującego siłę R_x za pomocą k_v i parametrów płynu oraz parametrów konstrukcyjnych opracowano metodę pomiaru i specjalne stanowisko badawcze do wyznaczania siły R_x [2].

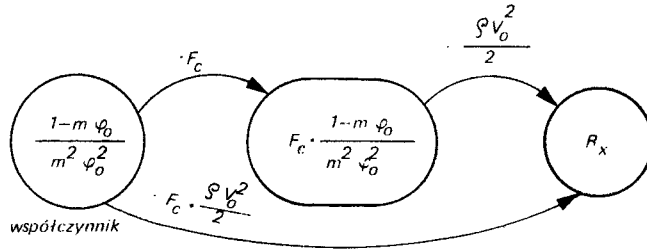
Porównanie otrzymanych wartości siły poosiowej działającej na przesłonę, z podanej powyżej zależności na R_x , z wynikami pomiarów wykazało, że wyniki obliczeń obarczone są zbyt dużymi błędami (rzędu kilkudziesięciu procent) i w związku z tym, nie można było przyjąć otrzymanej zależności za użyteczną do obliczeń technicznych.

Okazało się natomiast, że opierając się na zachowaniu struktury zależności na R_x można dojść do zależności praktycznie użytecznej.

Cechą podanej zależności na R_x jest następujące powiązanie iloczynem trzech czynników: ciśnienie

prędkości $\frac{\rho \cdot V_0^2}{2}$ razy przekrój obszaru kawerny za opływającą bryłą F_c razy współczynnik

$\frac{1-m\varphi_0}{m^2 \varphi_0^2}$ co za pomocą grafów można przedstawić następująco:



Przyjmując podejście teoretyczno-doświadczalne, poszukiwanie właściwej dla obliczeń inżynierskich zależności na R_x przeprowadzono zachowując niezmienną strukturę wzoru. Pozostawiono w nim czynon opisujący ciśnienie prędkości i czynon opisujący przekrój kawerny za kłapą w niezmienniej postaci, natomiast zmieniono postać czynonu-współczynnika.

Okazało się, że przy eliminacji we współczynniku licznika $(1-m\varphi_0)$ uzyskuje się wartości obliczanych sił poosiowych zgodnie z wartościami sił mierzonych z uwzględnieniem maksymalnego błędu bezwzględnego, wyznaczonego w analizie błędów pomiaru. Analizę przeprowadzono dla opracowanego stanowiska, zastosowanej aparatury, dokładności nastawy, tolerancji wykonawczych badanych przepustnic i uwzględniając korekcję zmiany wartości parametrów fizycznych dla warunków rzeczywistych przy badaniach.

Zależność na siłę poosiową (oporu) działającą na opływającą płynem dowolnie ukształtowaną kłapę w kanale zamkniętym przyjmuje następującą postać:

$$R_x = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot F_c \cdot \frac{1}{m^2 \cdot \varphi_0^2} = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot \frac{F_0(1-m\varphi_0)}{m^2 \cdot \varphi_0^2}$$

Po podstawieniu wyrażenia na φ_0 otrzymano:

$$R_x = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot \frac{F_0}{k_V^2} \cdot \left(\frac{2F_0^2 \cdot \Delta p}{\rho} + k_V^2 - k_V \cdot \sqrt{\frac{2F_0^2 \cdot \Delta p}{\rho} + k_V^2} \right)$$

lub

$$R_x = \frac{\rho \cdot V_0^2}{2} \cdot \frac{F_0}{k_V^2} \cdot \left[\left(\sqrt{\frac{2F_0^2 \cdot \Delta p}{\rho} + k_V^2} - \frac{1}{2}k_V \right)^2 - \frac{1}{4}k_V^2 \right]$$

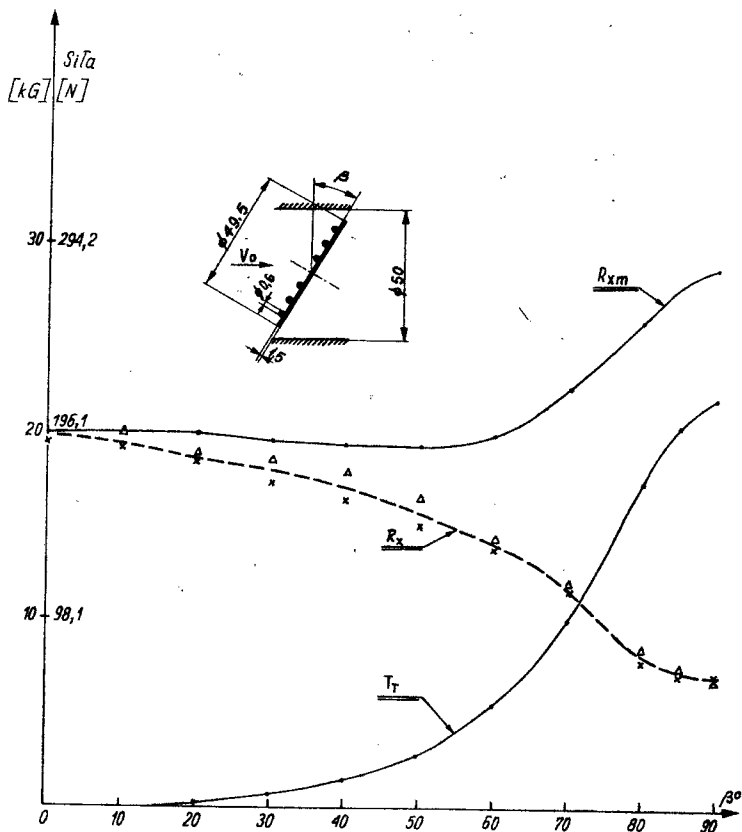
Występujące w otrzymanej zależności wielkości wynikają z rozwiązania danego elementu nastawczego (m, F_0), są zadane rodzajem przepływającego płynu i stanem w jakim on się znajduje (ρ), bądź są wielkościami fizycznymi zadanymi nastawami zmianami przekroju dla przepływu ($V_0, \Delta p, k_V$).

Są one zarazem zadanymi parametrami procesu obliczanej instalacji. Otrzymana zależność na R_x charakteryzuje się uwzględnieniem rzeczywistych i indywidualnych cech konstrukcyjnych i technologicznych elementu nastawczego oraz warunków jego pracy wynikających z rodzaju przepływającego płynu i stanu skupienia w jakim się on znajduje. Wynika to z faktu uwzględnienia w opisie R_x doświadczalnie wyznaczonego współczynnika k_v .

Współczynnik k_v jest określany według znormalizowanych w skali międzynarodowej zasad. Producenci elementów nastawczych, w podstawowej informacji katalogowej, są zobowiązani do podawania wartości k_v dla całego przedziału zmian nastaw.

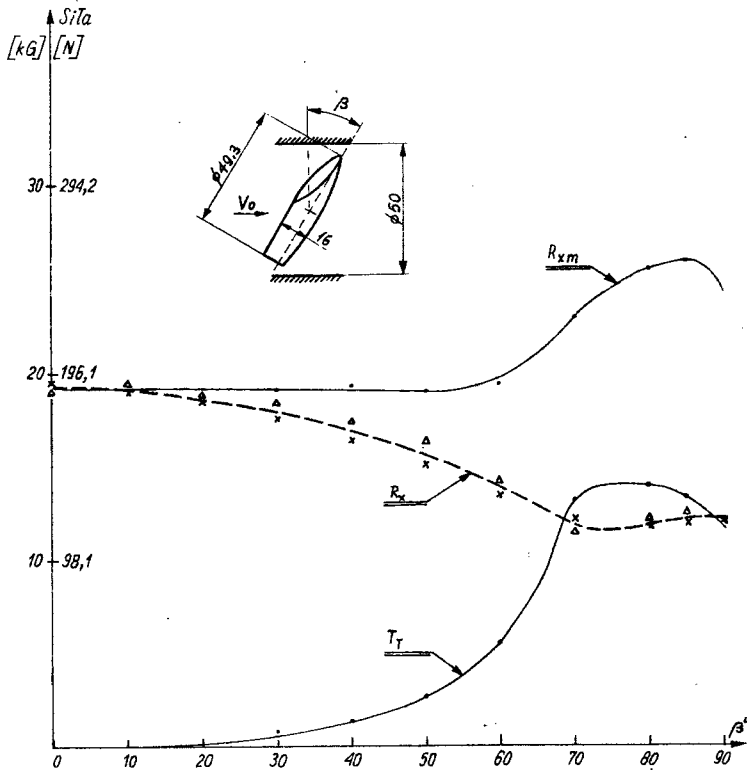
Dokładnie zostały opracowane i opisane zależności korekcji wartości k_v dla rzeczywistych płynów, ich stanów skupienia i warunków pracy elementów nastawczych. Zbiorcze informacje o współczynniku k_v i jego odpowiedniku C_v w angielskim systemie miar o sposobach i zależnościach do ich korekcji podaje literatura [1], [3].

Zgodność otrzymanych wyników obliczeń z wynikami otrzymanymi w drodze pomiarów ilustrują wykresy na rysunkach 2, 3, 4.



Rys. 2. Charakterystyka siły poosiowej $R_x = f(\beta)$ (mierzonej i obliczonej) działającej na klapę A przepustnicy; $R_x = R_{xm} - T_T$, T_T - siła tarcia (mierzona), R_{xm} - suma siły poosiowej i tarcia (mierzona), R_x - siła poosiowa (oporu), Δ - wartości R_x wyznaczone z pomiarów, x - wartości R_x obliczone

Celowo dobrano różne konfiguracje badanych klap, przepustnic. Wychylenie ich zmieniało równocześnie wolny przekrój dla przepływu i kształt bryły przesłony elementu nastawczego względem kierunku płynącego w przewodzie zamkniętym płynu.

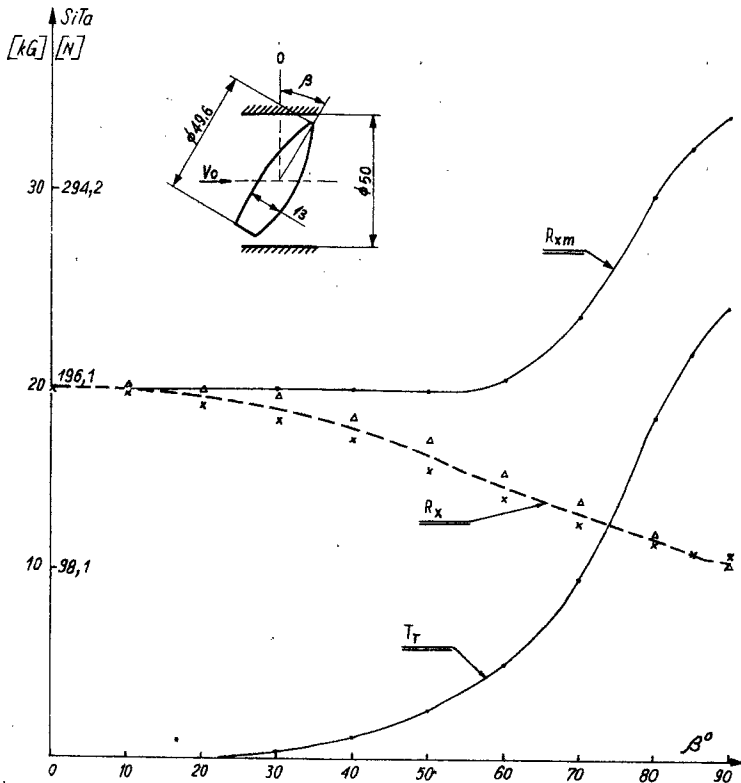


Rys. 3. Charakterystyka siły poosiowej $R_x = f(\beta)$ (mierzonej i obliczonej) działającej na klapę B przepustnicy; $R_x = R_{xm} - T_T$. T_T — siła tarcia (mierzona), R_{xm} — suma siły poosiowej i tarcia (mierzona), R_x — siła poosiowa (oporu), Δ — wartości R_x wyznaczone z pomiarów, x — wartości R_x obliczone.

Pomiary przeprowadzono przy przepływie wody przemysłowej o $\xi \approx 1000 \text{ kg/m}^3$ i $\Delta p = 98,0665 \text{ kPa}$ dla wychyleń klap w przedziale $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$. Analizę błędów pomiarów dla przyjętego układu pomiarowego do wyznaczania siły R_x jak i opis samego stanowiska przeprowadzono w [2].

Z analizy wynika, że maksymalny błąd względny pomiarów nie przekraczał 7%.

Otrzymane wartości siły R_x zmierzone i obliczone dla przypadków zilustrowanych na rysunkach 2, 3, 4, podano w tabelicy 1. Z zestawionych danych widać, że otrzymane wyniki nie różnią się od siebie więcej niż to wynika z błędów względnego pomiarów. Są one słuszne nie tylko dla jednego charakterystycznego przebiegu funkcji $R_x = f(\beta)$. Podane przykłady obejmują przebiegi funkcji $R_x = f(\beta)$ przedziałami monotonicznymi, z występowaniem ekstremum oraz punktów przegięcia.



Rys. 4. Charakterystyka siły poosiowej $R_x = f(\beta)$ (mierzonej i obliczonej) działającej na kłapę C przepustnicy; $R_x = R_{xm} - T_T$, T_T – siła tarcia (mierzona), R_{xm} – suma siły poosiowej tarcia (mierzona), R_x – siła poosiowa (oporu), Δ – wartości R_x wyznaczone z pomiarów, x – wartości R_x obliczone

Tablica 1

Zestawienie wartości sił poosiowych mierzonych $R_x \text{ pom}$ i wartości sił poosiowych obliczonych $R_x \text{ obl}$ w funkcji kąta wychylenia β kłap przepustnic o różnym ukształtowaniu

Kłapa		0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	85°	90°
A	$R_x \text{ pom}$	20,0	20,0	18,9	18,3	17,7	16,3	14,2	12,0	8,20	7,50	7,00
	$R_x \text{ obl}$	19,4	19,2	18,5	17,4	16,6	15,2	13,5	11,7	7,82	7,56	7,39
B	$R_x \text{ pom}$	19,0	19,5	18,9	18,2	17,3	16,1	14,0	11,4	12,0	12,5	12,6
	$R_x \text{ obl}$	19,2	19,0	18,4	17,5	16,4	15,2	13,6	12,1	11,7	11,9	12,1
C	$R_x \text{ pom}$	19,5	19,5	19,4	18,8	17,7	16,1	14,4	13,2	11,0	10,3	10,6
	$R_x \text{ obl}$	19,4	19,2	18,6	17,8	16,8	15,2	13,9	12,4	11,5	11,2	11,2

Wartości sił podano w kg zachowując rzeczywiste miano odczytu skali przyrządów stosowanych w pomiarach (1 kg \rightarrow 9,80665 N).

Literatura

- [1] Driskell L.R.: Control Valve Sizing with ISA Formulas. Instrumentation Technology, 1974, July.
- [2] Gałązka T.: Synteza głównych parametrów konstrukcyjnych przepustnic do sterowania automatycznego. Prace Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów. Zeszyt 1 (33) 1980.
- [3] ISA Handbook of Control Valves. Instrument Society of America. Pittsburgh 1973.