

440

BE 10

ZAKŁAD POMIARU PARAMETRÓW PRZEPIYWU - DPQ

Główny wykonawca

doc. dr inż. Tadeusz Gałązka



Wykonawcy:

Tadeusz Gałązka
Andrzej Staszewski
.....

Praca pt.

Wyznaczanie współczynników przepływu K_v w oparciu o badania modeli wybranych płynowych elementów regulacji i pomiarów.
Badania poznawcze.

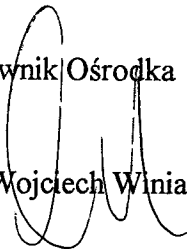
DOKUMENT WZORCOWY

Zleceniodawca

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Kierownik Ośrodka

mgr inż. Wojciech Winiarski



Z-ca Dyrektora. d/s Badawczo-Rozwojowych.

WZ

dr inż. Jan Jabłkowski

Pracę zakończono dnia 1998-07-27

NR arch. 7574

Nr umowy S1788

Analiza deskryptorowa

Elementy nastawcze regulacyjne i elementy armatury dla przepływu płynu – badania poznawcze – Współczynnik przepływu K_v .

Abstrakt

Opracowanie ujmuje wyprowadzenie i dyskusję zależności dla określenia wartości współczynnika K_v w oparciu o badanie modeli. Znalaziono kryteria podobieństwa dla elementów przepływowych, wzory i zależności dla przypadków wymagających korygowania. Efektem pracy jest opracowanie metody badań przy minimalnym nakładzie kosztów.

Tytuły poprzednich sprawozdań

Nie było

Rozdzielnik

Egz. 1. OIN

Egz. 2. DPQ

Egz. 3. DPQ

I. SPIS TREŚCI

	strona
I. Spis treści	1
II. Zestawienie ważniejszych oznaczeń	2
1. Podstawa opracowania	3
2. Wprowadzenie	3
3. Wybrane uwagi o teorii podobieństwa technicznego	5
3.1. Twierdzenia podstawowe teorii podobieństwa	7
3.2. Twierdzenia analizy wymiarowej	8
3.2.1. Sposoby określenia iloczynów K	9
4. Sposoby określenia kryteriów podobieństwa	9
4.1. Kryterium podobieństwa wynikające z opisu za pomocą równań różniczkowych przepływu płynu	10
4.2. Kryterium podobieństwa wynikające z analizy wymiarowej wielkości opisujących przepływ płynu lepkiego	13
5. Określanie wartości K_v w oparciu o badania modeli	16
6. Korekta wartości K_v	
6.1. Określanie współczynnika strat lokalnych i wykorzystania go do korekcji	20
7. Graniczne wartości strumienia objętości przy wyznaczaniu współczynnika K_v	24
7.1. Zakres granicy dolnej	24
7.2. Zakres dla granicy górnej	25
8. Wnioski	27
9. Literatura	28

II. ZESTAWIENIE WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ.

a – prędkość dźwięku, m/s

d – średnica najmniejszego przelotu elementu badanego, m (mm)

DN – średnica nominalna, m (mm)

c_p – średnie ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu, I/kg · IT

c_v – średnie ciepło właściwe przy stałej objętości, I/kg · IT

χ – wykładnik izentropy,

ρ - gęstość, kg/m³

g – przyspieszenie ziemskie, m/s²

η - współczynnik lepkości dynamicznej, N·s/m²

ν - współczynnik lepkości kinematycznej, m²/s; $\nu = \eta/\rho$

v – prędkość płynu, m/s

\vec{v} – wektor prędkości,

t – czas, s

L - charakterystyczny wymiar liniowy,

K_v – współczynnik przepływu, m³/h

p – ciśnienie, Pa

Δp – różnica ciśnień, Pa

\vec{F} – wektor wypadkowy siły masowej,

F_p – powierzchnia wolna dla przepływu, m²

Q_v – strumień objętości przepływającego płynu, m³/h

d_K – średnica klapy przepustnicy, m, (mm)

d_o – średnica piasty klapy przepustnicy (lub jej grubość), m (mm)

$F_{p_{wl}}$ – powierzchnia wlotu do badanego elementu, m² (mm²)

$F_{p_{wyl}}$ – powierzchnia wylotu z badanego elementu, m² (mm²)

F_{p_s} – skorygowana powierzchnia dla wolnego przepływu, m²

e – względna chropowatość rury,

k – bezwzględna chropowatość rury, m (mm)

1. PODSTAWA OPRACOWANIA.

Formalną podstawę opracowania stanowi Karta Otwarcia Zlecenia o numerze S1788, pt. „Wyznaczanie współczynników przepływu K_v w oparciu o badania modeli wybranych płynowych elementów do regulacji i pomiarów. Badania poznawcze.”

Praca realizowana była w ramach środków statutowych przyznanych przez Komitet Badań Naukowych dla Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów – PIAP.

Wniosek Nr 14/DPQ/97, Gł. Wykonawcy pracy, z Zakładu Pomiaru Parametrów Przepływu o otwarciu zlecenia zgodnie z obowiązującą procedurą po zaopiniowaniu przez: Kierownika Zakładu Parametrów Przepływu - DPQ, Kierownika Działu Planowania - NP, Zastępcę Dyrektora ds. Badawczo Rozwojowych - DB została zaakceptowana przez Dyrektora PIAP do realizacji.

2. WPROWADZENIE.

Elementy nastawcze automatyki oraz elementy armatury przemysłowej stosowane do instalacji dla przepływu płynu tworzą bardzo rozbudowany zbiór różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych i wykonań.

Wielorakość rozwiązań i wykonań wynika z różnorodności przepływającego płynu – ciecz, gaz, para, płynne i gazowe produkty chemiczne i spożywcze, ich mieszaniny, nośniki energii itp.

Każdy rodzaj przepływającego płynu zazwyczaj opisywany jest zmieniającym się zestawem parametrów fizycznych takich jak objętość, masa, lepkość, gęstość, temperatura, ciśnienie, agresywność w stosunku do określonych materiałów itp.

Wartości zaś parametrów fizycznych przepływającego płynu mogą się zmieniać o rzędy wartości, co uniemożliwia np. opłacalne technicznie wykonanie elementów nastawczych mogących pracować w całym zakresie ich zmian.

Przeznaczenie instalacji przepływowych wymusza potrzebę wytwarzania całego ciągu wielkości opisywanych średnicą nominalną przelotu rurociągów dla przepływu.

Konsekwencją dostosowania omawianych elementów do tak różnych zastosowań, w różniących się warunkach pracy, było powstanie dużej liczby odmian, typów i wielkości. Składają się na nie ujednolicone w skali międzynarodowej, wykonania materiałowe zależne od poziomu minimalnego i maksymalnego ciśnienia, temperatury i agresywności płynu oraz typów rozwiązań dostosowanych do różnorodnych zastosowań. Wspólne dla wszystkich omawianych elementów jest produkowanie ich w postaci zbiorów wielkości nazywanych typoszeregami.

Wielkości występujące w każdym typoszeregu uporządkowane są zgodnie z

ciągami liczb normalnych o mianach układu jednostek miar SI (metrycznych) lub jednostek miar angielskich i amerykańskich.

Liczący się na rynku krajowym i w eksporcie wytwórcy określonego rodzaju elementów takich, jak zawory regulacyjne, zawory kulowe, przepustnice itp, produkują nie takich samych wykonań od kilkuset do kilkunastu tysięcy rocznie. A takich samych elementów wytwarzają najczęściej od kilku do kilkudziesięciu sztuk rocznie.

Podstawowym parametrem służącym do doboru elementów nastawczych i armatury dla instalacji przepływowych jest znormalizowany współczynnik przepływu K_v . Jest on wyznaczany doświadczalnie. Powinien on być wyznaczony na stanowisku przepływowym spełniającym wymagania wg. normy międzynarodowej IEC 60534-2-3 Part 2-3 Flow capacity – test procedures, second edition 1997-12, Genewa. Podaje ona wymagania dla *stanowiska, aparatury pomiarowej i sposobu przeprowadzenia badań*. Normie tej odpowiada PN-83/M-74201 p.t. Zawory regulujące. Wymagania i badania..

Zunifikowany i szczegółowo dopracowany sposób doboru, wielkości odmian i typów, jak i warunków w jakich odbywa się praca elementów nastawczych i armatury do instalacji przepływowych, dokonuje się za pomocą współczynnika K_v . Zobowiązuje to wytwórcę do podawania wartości tego współczynnika w danych technicznych każdego z omawianych elementów w oparciu o udokumentowany sposób jego wyznaczenia.

Wyznaczenie K_v powinno być dokonane w badaniach pełnych.

Porównując ilości elementów, dla których powinien być wyznaczony współczynnik K_v , u każdego wytwórcy z ilością wytworzonych dla ściśle określonego wykonania oraz cenę ich sprzedaży z kosztami wytworzenia, nawet z kosztami badań rozłożonymi na szereg lat, widocznym staje się, że koszt badań takiej ich ilości w zbyt dużym stopniu będzie w znaczący sposób pomniejszał zysk wytwórcy.

Wszelkie działania typu minimalizacji kosztów własnych wytworzenia przy sprzedaży małej ilości sztuk nie da zadowalającego rezultatu. Również minimalizacja kosztów badań, ze względu na koszt zużywanej energii, koszt obsługi i utrzymania w gotowości stanowisk do badań jest bardzo ograniczony.

W warunkach naszego kraju można zaryzykować stwierdzenie, że cena badań równa jest, a nawet w niektórych przypadkach mniejsza od kosztów ponoszonych na badania. Wytwórcy bowiem przeprowadzają badania dla bardzo małej ilości produkowanych wyrobów tylko tych, gdzie wymuszone jest to potrzebą udokumentowania podawanych wartości parametrów technicznych na potrzeby eksportu, starania się o aprobaty techniczne lub certyfikaty zgodności np. z określonym systemem jakości wg. norm ISO 9000 itp.

Oczywiście ponoszone z tego tytułu koszty zazwyczaj służą podniesieniu ceny

elementów i stosowaniu praktyk podawania w sposób nieudokumentowany wartości K_v w danych technicznych, przez analogię do wartości K_v podawanych dla podobnych elementów przez innych wytwórców.

Autor opracowania wyszedł z założenia, że rozwiązanie podobnego do węzła gordyjskiego problemu może nastąpić tylko wtedy, gdy badania będą przeprowadzane na jak najmniejszej ilości elementów – modelach, a ich wyniki w sposób udokumentowany pozwolą określić wartości współczynnika K_v dla pozostałych niebadanych elementów.

Wykorzystanie wyników badań modeli do określenia wartości parametrów elementów spełniających kryteria podobieństwa umożliwi zastosowanie teorii podobieństwa technicznego.

Podaje ona zasady postępowania dla wyprowadzenia zależności umożliwiających dla rozpatrywanego przypadku udokumentowane określenie wartości K_v , produkowanych elementów w oparciu o wyniki badań ich modeli. Wymaga to określenia warunków badań i kryteriów podobieństwa pomiędzy modelami a elementami, dla których w oparciu o wyniki badań modeli określamy wartość poszukiwanego parametru.

3. WYBRANE UWAGI O TEORII PODOBIEŃSTWA TECHNICZNEGO.

Pojęcie podobieństwa towarzyszy nam od najwcześniejszych lat edukacji. W elementarnej geometrii omówienie podobieństwa podawane jest dla figur geometrycznych między innymi trójkątów. Wiemy, że dwie płaskie figury są podobne, jeśli dadzą się ustawić w ten sposób na dwóch równoległych płaszczyznach, że wszystkie proste przechodzące przez odpowiadające sobie punkty obu figur przecinają się w jednym punkcie, nazywanym środkiem perspektywy, względnie podobieństwa. Zasady perspektywy są podstawą w nauce rysunku dla przedstawienia na płaszczyźnie nie tylko płaskich ale i trójwymiarowych obiektów.

W przypadku figur geometrycznych podobne do siebie będą np. tylko te trójkąty, które mają odpowiednio równe kąty, nie będą jednak podobne figury powstałe przez odwzorowanie wiernokątne. W przypadku prostokątów podobne do siebie będą te, które charakteryzują się jednakowym stosunkiem boków.

Uzyskanie podobieństwa dwóch procesów technicznych, poza zachowaniem podobieństwa geometrycznego, wymaga takiego dobrania wartości innych wielkości fizycznych, aby skale jednoimiennych wielkości, w odpowiadających sobie pod względem geometrycznym punktach były dla całego elementu stałe, niezależnie od miejsca i czasu.

Skale jednoimiennych wielkości stanowią stosunek, wielkości na modelu do wielkości na obiekcie rzeczywistym.

Mogą to być skale prędkości k_v , przyspieszenia k_g , ciśnień k_p , lepkości k_η , gęstości k_ρ , wymiarów k_L , czasu k_τ i t_p o postaci:

$$k_v = \frac{v'}{v}$$

K_v jest ilorazem prędkości płynu przepływającego przez model v' do prędkości płynu przepływającego przez obiekt v dla określenia parametrów którego badania modelu wykonano i analogicznie:

$$k_\tau = \frac{t'}{t}; k_g = \frac{g'}{g}; k_p = \frac{p'}{p} = \frac{\Delta p'}{\Delta p}; k_\eta = \frac{\eta'}{\eta}; k_\rho = \frac{\rho'}{\rho}; k_L = \frac{L'}{L} \quad \text{itp}$$

Teoria podobieństwa podaje warunki, jakie powinny spełnić skale poszczególnych wielkości w przypadku podobieństwa technicznego np.:

$$\frac{k_p k_v k_e}{k_\eta} = 1 = \frac{\rho' v' \varepsilon' \eta}{\rho v \varepsilon \eta'} \quad \text{lub} \quad \frac{\rho v \varepsilon}{\eta} = \frac{\rho' v' \varepsilon'}{\eta'} = Re$$

$$\frac{k_p}{k_\rho k_v^2} = 1 = \frac{p' \rho v^2}{p \rho' v'^2} \quad \text{lub} \quad \frac{p}{\rho v^2} = \frac{p'}{\rho' v'^2} = Eu$$

$$\frac{k_g k_L}{k_v^2} = 1 = \frac{g' L' v^2}{g L v'^2} \quad \text{lub} \quad \frac{g L}{v^2} = \frac{g' L'}{v'^2} = Fr$$

$$\frac{k_\tau k_v}{k_e} = 1 = \frac{\tau' v' L}{\tau v L'} \quad \text{lub} \quad \frac{v \tau}{e} = \frac{v' \tau'}{e} = H_o \equiv St$$

$$\text{albo} \quad \frac{\dot{v}}{a} = \frac{v'}{a'} = Ma \quad \text{gdzie: } a = \sqrt{\chi p / g}; \quad \chi = \frac{c_p}{c_v}$$

Uwaga: ') Apostrof przy wielkości mówi, że służy ona do opisanie modelu.

Liczby Re; Eu; Fr; Ho; Ma itp nazywane są:

Eu – liczbą Eulera;

Fr – liczbą Frouda;

$St \cong Ho$ – liczbą Strouhala lub liczbą współczesności albo jednoczesności;

Ma – liczbą Macha.

W teorii podobieństwa technicznego stanowią one zwykle kryteria lub niezmienniki podobieństwa.

3.1. Twierdzenia podstawowe teorii podobieństwa.

Teoria podobieństwa dla procesów opisywanych równaniami różniczkowymi opiera się na trzech twierdzeniach, których uzasadnienia podano między innymi w [3], [4], [6]:

– twierdzenie Newtona

Jeżeli zbiór zjawisk określonych układem równań różniczkowych stanowi grupę zjawisk podobnych, to wielkości występujące w układzie równań różniczkowych tworzą bezwymiarowe kombinacje, nazywane kryteriami lub inwariantami (niezmiennikami) podobieństwa, a ich wartości liczbowe dla wszystkich zjawisk podobnych są takie same.

– twierdzenie Federmana-Buckinghama

Całka ogólna równania różniczkowego da się przedstawić jako funkcja kryteriów podobieństwa, określonych za pomocą tego równania.

– twierdzenie Kirpiczewa-Guchmana

Zbiór zjawisk, określony układem równań różniczkowych i warunkami jednoznaczności stanowią podobną grupę przekształceń, a kryteria podobieństwa określone posiadają te same wartości liczbowe.

Zachowując zgodność skal i ich współzależności oraz zgodność kryteriów wynikających z twierdzeń, można w danym konkretnym przypadku obejmującym podobny proces wyprowadzić wzór opisujący współzależność pomiędzy wielkościami modelu i obiektu rzeczywistego. Na podstawie tego wzoru można z kolei określić wartości poszukiwanych parametrów obiektu rzeczywistego w oparciu o wartości określone doświadczalnie na modelu.

W przypadku gdy nie są znane równania różniczkowe opisujące badany proces teoria podobieństwa opiera się na analizie wymiarowej.

Wykorzystywana analiza wymiarowa dotyczy gałęzi matematyki stosowanej, której zadaniem jest wyznaczenie poprawnej pod względem wymiarowym postaci wzorów fizycznych. Pozwala ona również na wyrażenie zachowania się

układu fizycznego za pomocą najmniejszej liczby zmiennych niezależnych i to w sposób niezależny od zastosowania jednostek miar. W analizie wymiarowej dowodzi się, że każdemu równaniu fizycznemu można przyporządkować równanie wymiarowe. Równanie to posiada tę samą postać co równanie fizyczne, a wymiary uporządkowane są w ten sam sposób co wielkości fizyczne. Jednemu równaniu fizycznemu odpowiada jedno równanie wymiarowe, którego postać zależy od układu wielkości podstawowych. W mechanice za wielkości podstawowe przyjmuje się: długość – l; czas – τ i masę – kg albo długość – l, siłę – N i czas – τ .

Teoria podobieństwa dla procesów opisywanych przy pomocy analizy wymiarowej opiera się na czterech twierdzeniach wyszczególnionych poniżej, których uzasadnienie podano między innymi w [3].

3.2. Twierdzenia analizy wymiarowej.

- 1) Wymiar każdej wielkości pochodnej może być wyrażony jako iloczyn potęgowy wymiarów wielkości podstawowych, pomnożony przez wielkość stałą bezwymiarową.
- 2) Twierdzenie Buckinghama: współzależności fizycznej

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n) = 0$$

zawierającej wielkości Q odpowiada wzór:

$$f(K_1, K_2, \dots, K_{n-m}) = 0$$

gdzie m oznacza liczbę wielkości podstawowych, wybranych spośród wielkości Q, a ściślej rząd macierzy wymiarowej. K_1, K_2, \dots są bezwymiarowymi iloczynami utworzonymi z wielkości Q.

- 3) Zupełne równanie fizyczne, wyrażone w postaci funkcji wielkości Q, występujących w rozpatrywanym zjawisku da się przedstawić w postaci funkcji niezależnych od siebie wielkości bezwymiarowych K, utworzonych z potęg wielkości Q. Przez zupełne równanie fizyczne rozumiemy równanie, które pozostaje słuszne niezależnie od zmiany jednostek miary.

Zbiór iloczynów K nazywamy zbiorem pełnym, jeżeli:

- a) każdy z nich jest niezależny od pozostałych,
- b) każdy inny iloczyn K, utworzony z tychże wielkości jest zależny od iloczynów zbioru pełnego.

Wielkości Q_1, Q_2, \dots, Q_n są wymiarowo niezależne, jeżeli z tożsamości:

$$[Q_1^a][Q_2^b] \dots [Q_n^x] = 1$$

wynika

$$a = b = \dots = x = 0$$

- 1) Wszystkie prawa fizyki wyrażają się równaniami wymiarowo jednorodnymi. Jest to zasada Fouriera. Inaczej można ją sformułować następująco: funkcja jest wymiarowo jednorodna, gdy postać jej nie zależy od jednostek miary. Matematycznie zapisujemy to w następującej postaci:

funkcja $f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ jest wymiarowo jednorodna, gdy zachodzi tożsamość:

$$f(a_1 Q_1, a_2 Q_2, \dots, a_n Q_n) = a f(Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$$

3.2.1. Sposoby określenia iloczynów K.

Do określenia iloczynów K najczęściej stosowana jest metoda Rayleigha. Jednakże podana niżej metoda [4] jest o wiele wygodniejsza, gdyż pozwala na oddzielne obliczanie każdego iloczynu K.

Spośród wielkości fizycznych Q wybieramy tyle wielkości $Q_n, Q_{n-1}, \dots, Q_{n-m+1}$, różniących się pomiędzy sobą wymiarami ile jednostek wymiarowych m występuje w tym zagadnieniu. Wybór tych wielkości jest dowolny, ale z rozpatrzenia dla różnych przykładów wynika, że nie każda kombinacja jest w praktyce jednakowo wygodna.

Z pozostałych $n-m$ wielkości fizycznych tworzymy $n-m$ bezwymiarowych iloczynów K rozwiązując następujące równania:

$$\begin{aligned} K_1 &= Q_1 Q_n^{a_1} Q_{n-1}^{a_2} \dots Q_{n-m+1}^{a_m} \\ K_2 &= Q_2 Q_n^{b_1} Q_{n-1}^{b_2} \dots Q_{n-m+1}^{b_m} \\ &\dots\dots\dots \\ &\dots\dots\dots \\ K_{n-m} &= Q_{n-m} Q_n^{x_1} Q_{n-1}^{x_2} \dots Q_{n-m+1}^{x_m} \end{aligned}$$

W każdym równaniu dobieramy tak wykładniki potęgowe $a_1, a_2 \dots a_m, b_1, b_2 \dots b_m$, aby iloczyny K były bezwymiarowe. W tym celu każdemu równaniu K przyporządkujemy równanie wymiarowe co pozwala na obliczenie wartości liczbowych wykładników potęgowych.

4. SPOSOBY OKREŚLENIA KRYTERIÓW PODOBIEŃSTWA.

W oparciu o przytoczone powyżej twierdzenia kryterium podobieństwa dla rozwiązywanego zagadnienia określane może być w oparciu o:

- równania różniczkowe jeśli istnieje opis dla badanego procesu za ich pomocą
- analizy wymiarowej, gdy nie znamy równań różniczkowych opisujących badany proces
- równań opisujących badane zjawisko.

W tym ostatnim przypadku zadanie sprowadza się do wyznaczenia

bezwymiarowej postaci równań opisujących badane zjawisko i utworzenia analogicznej bezwymiarowej postaci dla modelu. Po ich przyrównaniu należy wydzielić z nich człony odgrywające rolę kryteriów podobieństwa.

Jeśli możliwe jest wykorzystanie każdego z przytoczonych sposobów to preferowane jest oparcie się na równaniach różniczkowych, w następującej kolejności na równaniach opisujących badane zjawisko i/lub na analizie wymiarowej.

Dla przypadków pośrednich szczególnie, gdy badania w oparciu o teorię podobieństwa są wielokrotnie wykonywane dla podobnych procesów wskazane jest wyprowadzenie kryteriów podobieństwa więcej niż jednym sposobem, co powinno uchronić przed popełnieniem grubych błędów typu pominięcia np. istotnego dla rozpatrywanego procesu kryterium. Podstawową sprawą przy stosowaniu teorii podobieństwa jest gruntowne poznanie i zrozumienie przebiegu badanego procesu.

Poniżej określono kryteria podobieństwa dla wyznaczenia współczynnika K_v .

W celu wyprowadzenia zależności za pomocą, której można określić znormalizowany współczynnik przepływu K_v dla występujących w typoszeregu wielkości elementów nastawczych i armatury dla instalacji przepływowych, w oparciu o badania modeli, posłużono się:

- opisem za pomocą równań różniczkowych przepływu płynu,
- analizą wymiarową.

4.1. Kryterium podobieństwa wynikające z opisu za pomocą równań różniczkowych przepływu płynu.

Ogólne ujęcie opisu ruchu przepływu płynu lepkiego i nieściśliwego za pomocą równań różniczkowych podają równania różniczkowe Nawiera-Stokesa.

Posłużono się ogólnym równaniem różniczkowym podanym w postaci wektorowej

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{v}$$

Sprowadzono podane równanie do postaci bezwymiarowej wprowadzając bezwymiarowe; ciśnienie, prędkość, czas, gęstość o postaci:

$$\bar{p} = \frac{p}{p_0}; \quad \bar{v} = \frac{v}{v_0}; \quad \tau = \frac{t}{t_0}; \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}$$

Podane symbole p , ρ , v oznaczają bezwymiarowe ciśnienie i gęstość oraz bezwymiarowy wektor prędkości odniesione do pewnej stałej prędkości charakterystycznej v_0 . Dla badań elementów nastawczych i armatury może to być np. prędkość przepływu niezakłóconego w znacznej odległości od opływanej przesłony badanego elementu oraz odpowiadających tej prędkości ciśnieniu p_0 i gęstości ρ_0 . Należy również pamiętać, że prędkość stanowi iloraz wymiaru liniowego i czasu, a to oznacza jakiś charakterystyczny czas w rozpatrywanym przepływie.

Po podstawieniu bezwymiarowej postaci wielkości występujących w równaniu Naviera-Stokesa i po przekształceniach otrzymamy:

$$\frac{L}{v_0 t_0} \cdot \frac{dv}{d\tau} = \frac{gL}{v_0^2} \cdot \frac{\bar{F}}{g} - \frac{p_0}{\rho_0 v_0^2} \cdot \frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \frac{v}{Lv_0} \cdot \Delta \bar{v}$$

Po podstawieniu do równania w miejsce stałych członów, niezmienników – stałych liczb Strouhala, Frouda, Eulera i Reynoldsa otrzymano:

$$\frac{1}{St} \cdot \frac{d\bar{v}}{d\tau} = \frac{1}{Fr} \cdot \frac{\bar{F}}{g} - Eu \cdot \frac{1}{\rho} \text{grad}(\bar{p}) + \frac{1}{Re} \cdot \Delta \bar{v}$$

Ta postać równania Naviera-Stokesa ujmuje w sposób ogólny prawo podobieństwa dynamicznego przepływu.

Dwa przepływy (dla badanego modelu i doświadczalnie niebadanego obiektu) będą dynamicznie podobnymi, jeśli przy zachowaniu geometrycznego podobieństwa powierzchni brzegowych ograniczających przepływ niezmienniki (St ; Fr ; Eu i Re) przekształconego równania Naviera-Stokesa utworzone z odpowiadających sobie w obydwu przepływach wielkości L , v_0 ; t_0 ; g ; p_0 ; ρ_0 i v mają tę samą wartość w obu przepływach.

Podobieństwo geometryczne powierzchni brzegowych rozumieć należy jako podobieństwo geometryczne kształtów bryły opływowej np. nastawnika i/lub kanałów korpusu, przez które odbywa się przepływ.

Należy zwrócić uwagę na możliwość przekształcenia członu $1/\rho \text{grad}(\bar{p})$ do postaci $p_0/\rho v_0^2 \equiv 1/\chi \cdot 1/Ma^2$ gdzie: $\chi = cp/cv$, co jest istotne dla dużych prędkości przepływów i uwzględnienia ściśliwości przepływającego płynu np. dla przepływu gazu.

Rozwinięcie podanego opisu w układzie przestrzennym dla kierunków we

współrzędnych prostokątnych podano w [7], [9].

Wynikiem podanych w tym punkcie rozważań jest konkluzja, że by przepływ w modelu i obiekcie rzeczywistym był podobny, niezmienniki – stałe liczby przekształconego równania Naviera-Stokesa powinny być zgodne z twierdzeniem Federmana-Buckinghama, co wymaga spełnienia warunku:

$$f(\text{St}; \text{Fr}; \text{Eu}; \text{Re}) = 0$$

Dla przypadku wyznaczania wartości współczynnika K_v na stanowisku badawczym płynem przepływającym jest woda, a przepływ w trakcie badań odbywa się rurociągami usytuowanymi poziomo w stanie ustalonym.

Wymagania norm zalecają przeprowadzenie badań przy $\text{Re} \geq 10^5$, a więc w zakresie przepływu burzliwego-turbulentnego.

Podane warunki badań powodują, że można przyjąć, że rozkład prędkości, a tym samym ciśnień w przekroju rurociągu jest stały i w postaci bezwymiernej $\text{grad } p = \text{const}$, co jest typowe dla rozkładu prędkości przy przepływie turbulentnym.

Zastosowanie do badań wody w temperaturze od 5 do 40°C powoduje, że można przyjąć $\rho = \text{const}$ dla modelu i obiektu, jednakowe zaś warunki przepływu rurociągami poziomymi pozwalają pominąć wpływ sił masowych powodowanych przyspieszeniem grawitacyjnym g i ciężarem właściwym $\gamma = \rho g$ w odniesieniu do sił dynamicznych $\bar{F}/g \cong 0$ i pozwala pominąć liczbę Froude'a. Ponieważ przepływ w trakcie badań odbywa się w stanie ustalonym, wówczas $d\bar{v}/d\tau \approx 0$ i liczbę Strouhalda również można pominąć.

Uwzględnienie rzeczywistych warunków wyznaczania znormalizowanego współczynnika pozwoliło określić, które niezmienniki mają istotne znaczenie i że powinny one spełnić warunek

$$f(\text{Eu}; \text{Re}) = 0 \quad \text{lub} \quad \text{Eu} = f(\text{Re})$$

a istotnymi dla rozpatrywanego przypadku wielkościami fizycznymi są: ciśnienie bądź różnica ciśnień $p \equiv \Delta p$, prędkość przepływu płynu – v ; współczynnik lepkości dynamicznej – $\eta \equiv \rho \cdot \nu$; gęstość – ρ i charakterystyczną długość – L , którą może być np. najmniejsza średnica przelotu przy pełnym otwarciu.

Z zasad podobieństwa dla modelu i obiektu, dla którego poszukujemy niezmienniki Eu i Re opisywane są zależnościami

$$\text{Eu} = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = \frac{\Delta p'}{\rho (v')^2 L} \quad \text{Re} = \frac{\rho v L}{\eta} = \frac{\rho' v' L'}{\eta'}$$

Ponieważ dla wody w podanych powyżej warunkach $\rho = \text{const}$, podane

zależności upraszczają się do postaci

$$\frac{\Delta p}{v^2} = \frac{\Delta p'}{v'^2} \quad a \quad \frac{v L}{\eta} = \frac{v' L'}{\eta'}$$

oraz że zachodzi pomiędzy nimi zależność

$$\frac{\Delta p}{v^2} = f(\text{Re}) = f\left(\frac{v L}{\eta}\right)$$

Z porównania i równości liczb Reynoldsa dla modelu i obiektu po wyrugowaniu ze względu na tę samą ciecz przepływającą w modelu, jak i przyjętą dla obiektu w tej samej temperaturze i o tej samej gęstości i lepkości dynamicznej otrzymamy:

$$\text{Re} = \text{Re}' = v L = v' L' = \frac{L}{L'} \frac{v'}{v}$$

Podane kryterium wskazuje, że w takim samym stosunku, w jakim pomniejszyliśmy model należy zwiększyć prędkość przepływu przez model.

Z porównania zaś i równości liczb Eulera otrzymamy

$$\text{Eu} = \text{Eu}' = \frac{\Delta p}{v^2} = \frac{\Delta p'}{(v')^2}$$

Po uwzględnieniu wykazanej wcześniej zależności od liczb Reynoldsa po przekształceniach otrzymamy

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = \frac{v^2}{(v')^2} = \left(\frac{L'}{L}\right)^2 \frac{Fp'}{Fp}$$

Wyprowadzone zależności są podstawowymi kryteriami podobieństwa do badań nastawczych elementów i armatury dla instalacji przepływowych płynu lepkiego otrzymanymi w oparciu o równania różniczkowe opisujące przepływ płynu.

4.2. Kryterium podobieństwa wynikające z analizy wymiarowej wielkości opisujących przepływ płynu lepkiego.

W oparciu o własne doświadczenie autora uzyskane przy badaniu różnorodnych elementów przepływowych jak i przyjmowane w zależnościach oraz wymaganiach dla przeprowadzania badań do wyznaczania znormalizowanego współczynnika przepływu K_v za istotne wielkości fizyczne uznano: ρ - gęstość; η - współczynnik lepkości dynamicznej; v - prędkość; p - ciśnienie wymiarowo

równoważne różnicy ciśnień Δp i L - długość.

W jednostkach miar przyjętych powyżej $n = 5$ wielkości fizycznych występują trzy podstawowe jednostki miar $m = 3$. Są to: długość – L , siła – N ; czas – s .

Zgodnie z twierdzeniem Buckinghama, zależności fizyczne ujmujące wymienione $n = 5$ wielkości tworzą funkcję

$$f(\rho; \eta; v; \Delta p; L) = 0$$

Funkcja ta opisywana jest za pomocą $i = n - m$ iloczynów o postaci $f(K_1, \dots, K_{n-m}) = 0$ dla $n - m = 5 - 3 = 2$ opisywana funkcja ma postać $f(K_1; K_2) = 0$.

Przejście z wybranych wielkości fizycznych na wielkości fizyczne spełniające kryteria podobieństwa w oparciu o podane twierdzenia analizy wymiarowej realizuje się w oparciu o macierz bezwymiarowych iloczynów K i znalezienia wykładników potęgowych dla każdej z wielkości tworzących iloczyn.

Rozwiązania dla tego typu zadań przedstawia się w postaci funkcji niezależnych od siebie wielkości bezwymiarowych, będących iloczynami K przyjętych wielkości fizycznych o nieznanymi wykładnikami potęgowych. Do znalezienia wartości liczbowych wykładników stosowana jest metoda Rayleigha. W niniejszym opracowaniu zastosowano metodę podaną przez prof. dr inż. Ludwika Mullera w [4].

W rozpatrywanym przypadku dla wybranych wielkości fizycznych przyjęto poniżej podany opis.

$$K_1 = \eta \rho^{x_1} L^{y_1} v^{z_1}$$

$$K_2 = p \rho^{x_2} L^{y_2} v^{z_2}$$

Wyznaczenie wykładników potęgi x_i, y_i, z_i dokonywane jest na podstawie analizy mian podanych wielkości fizycznych.

W przypadku K_1 mamy:

$$[K_1] = \frac{N \cdot s}{L^2} \cdot \frac{(N \cdot s^2)^{x_1}}{L^{4x_1}} \cdot L^{y_1} \cdot \frac{L^{z_1}}{s^{z_1}}$$

co odpowiednio dla jednostek siły – N ; długości – L i czasu – s , pozwala przedstawić zależność na K_1 dla wymienionych jednostek miar w postaci trzech równań z trzema niewiadomymi - wykładnikami potęg:

$$\text{dla } N: 1 + x_1 = 0$$

$$\text{dla } L: -2 - 4x_1 + y_1 + z_1 = 0$$

$$\text{dla } s: 1 + 2x_1 - z_1 = 0$$

Rozwiązanie tego układu równań daje wynik:

$$x_1 = -1; y_1 = -1; z_1 = -1$$

czyli K_1 opisywane jest zależnością:

$$K_1 = \frac{\eta}{\rho L v} = \frac{\nu}{L v} \equiv \frac{1}{Re}$$

Postępując analogicznie dla K_2 otrzymamy:

$$[K_2] = \frac{N}{L^2} \cdot \frac{N^{x_2} s^{2x_2}}{L^{4x_2}} \cdot L^{y_2} \cdot \frac{L^{z_2}}{s^{z_2}}$$

$$\text{dla } N: 1 + x_2 = 0$$

$$\text{dla } L: -2 - 4x_2 + y_2 + z_2 = 0$$

$$\text{dla } s: 2x_2 - z_2 = 0$$

skąd:

$$x_2 = -1; y_2 = 0; z_2 = -2$$

$$K_2 = \frac{\Delta p}{\rho v^2} \equiv \frac{p}{\rho v^2} \equiv Eu$$

W wyniku zależność $f(K_1, K_2) = 0$ (dla $L \equiv DN \equiv d$) przyjmie postać:

$$f\left(\frac{v}{v DN}; \frac{\Delta p}{\rho v^2}\right) = 0 \Rightarrow f(Re, Eu) = 0$$

lub

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2} = f(Re)$$

Wyprowadzone kryterium podobieństwa pokazuje, że iloraz $\Delta p/v$ zależy jedynie od liczby Reynoldsa. Ponieważ gęstość wody w rozpatrywanym przypadku dla przepływów w modelu i obiekcie rzeczywistym będzie taka sama. Otrzymana zależność upraszcza się do postaci:

$$\frac{\Delta p}{v^2} = f(Re)$$

co oznacza, że w przekształceniu niezmienniczym względem Re :

$Re' = Re = \text{const}$ lub że dla modelu i obiektu rzeczywistego zachodzi zależność:

$$\frac{\Delta p}{v^2} = \frac{\Delta p'}{(v')^2} \quad \text{albo} \quad \frac{\Delta p}{\Delta p'} = \frac{v^2}{(v')^2}$$

Wyprowadzone kryterium podobieństwa dla rozpatrywanego zagadnienia wyznaczania znormalizowanego współczynnika K_v jest identyczne jak dla kryterium podobieństwa wyznaczonego w oparciu o opis przepływu płynu za pomocą równań różniczkowych.

5. OKREŚLENIE WARTOŚCI K_v W OPARCIU O BADANIA MODELI.

Współczynnik znormalizowany przepływu K_v nie występuje i nie powinien być ujmowany w ogólnym równaniu różniczkowym opisującym przepływ płynu, jak i nie był rozpatrywany w analizie wymiarowej ze względu na jego analogiczne miano takie jakie ma strumień objętości. K_v posiada miano m^3/s analogiczne jak miano strumienia objętości Q_v - m^3/s . Jest natomiast uniwersalnym współczynnikiem zdefiniowanym dla podstawowych stanów fizycznych w jakich najczęściej on występuje w technice (ciecz, gaz, para, para nasycona) i opisanym w sposób sformalizowany. Powoduje to, że za jego pomocą dobiera się odpowiednie wielkości elementów nastawczych i armatury do wielkości instalacji przepływowych, zależnych od stanu fizycznego przepływającego płynu.

W sposób uniwersalny ze względu na jego wyznaczenie na drodze doświadczalnej podobnie jak strat lokalnych, ruguje albo ujednocila stosowane zamiennie wartości strat lokalnych i K_v dla obliczeń parametrów instalacji.

Wartości K_v przy zachowaniu opisanych w punkcie 4.1 wymagań obliczyć można z zależności z mianami wg. SI

$$K_v = 10 Q_v \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\Delta p}}$$

Opis K_v jest taki sam dla modelu, jak i dla obiektu, dla którego chcemy znaleźć K_v w oparciu dane uzyskane z badań modelu stosując teorię podobieństwa technicznego. Zestawiając takie same zależności dla obiektu i modelu i dzieląc je przez siebie dla uzyskania bezwymiarowej postaci otrzymamy:

$$\frac{K_v}{K_v'} = \frac{10 Q_v \sqrt{\rho/\Delta p}}{10 Q_v' \sqrt{\rho'/\Delta p'}}$$

Po wyrugowaniu stałych wartości otrzymamy:

$$\frac{K_v}{K_v'} = \frac{Q_v}{Q_v'} \sqrt{\frac{\Delta p'}{\Delta p}}$$

Po zastąpieniu strumieni objętości przepływających przez obiekt i model przez iloczyn, prędkości razy przekrój otrzymamy równanie zawierające wyprowadzone kryteria podobieństwa:

$$\frac{K_v}{K_v'} = \frac{F_p}{F_p'} \cdot \frac{v}{v'} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p'}{\Delta p}}$$

Po wprowadzeniu zależności wynikających z kryteriów podobieństwa otrzymamy:

$$\frac{K_v}{K_v'} = \frac{F_p}{F_p'} \frac{v}{v'} \sqrt{\frac{v'^2}{v^2}} = \frac{F_p}{F_p'}$$

lub

$$K_v = K_v' \frac{F_p}{F_p'}$$

Wyprowadzony wzór pozwala obliczyć współczynnik przepływu K_v na podstawie wyznaczonego doświadczalnie współczynnika przepływu K_v' modelu, przy uwzględnieniu stosunku wolnej powierzchni dla przepływu przez obiekt rzeczywisty do wolnej powierzchni przepływu przez model.

W przypadku elementów o powierzchni kołowej o średnicy nominalnej DN podłączanych do rurociągów – dla różnorodnych rodzajów zaworów

$$F_p = \frac{\pi}{4} DN^2 \quad \text{a} \quad F_p' = \frac{\pi}{4} (DN')^2$$

otrzymujemy:

$$K_v = K_v' \frac{DN^2}{(DN')^2} \quad \text{lub} \quad K_v = K_v' \frac{d^2}{(d')^2} \quad \text{gdy:}$$

$d \neq DN$ – powierzchnia przepływu opisana przez d zwierciadła nie jest równy powierzchni opisanej przez DN .

W przypadku przepustnic:

$$F_p = \pi/4 (1 - K^2 \cos\beta) \cdot DN^2$$

oraz

$$F_p' = \pi/4 (1 - K^2 \cos\beta) (DN')^2$$

gdzie: β - kąt pochylenia klapy przepustnicy

$K = d_k/DN$ gdzie: d_k – średnica klapy przepustnicy

a

$$K_v = K_v' DN^2/(DN')^2$$

Uwaga: przy wyznaczaniu wartości K_v dla pełnego otwarcia trzeba w zależności od rozwiązania konstrukcyjnego określić wolny przekrój dla przepływu jako różnicę powierzchni dla średnicy nominalnej pomniejszoną o powierzchnię elementów ograniczających.

W przypadku przepustnic

$$F_p = \pi/4 DN^2 - d_o d_k$$

gdzie: d_o jest średnicą piasty lub grubością klapy.

6. KOREKTA WARTOŚCI K_v .

Wszyscy twórcy i autorzy publikowanych rozwiązań, w których zastosowano zasady lub elementy teorii podobieństwa technicznego, bogaty spis których podano w [4], zwracają uwagę na konieczność aktywnego kształtowania rozwiązań, a nie niezmienniczego stosowania wyprowadzonych rozwiązań.

Podstawowa rola aktywnego kształtowania odnosi się do dokładnego poznania przebiegu zjawisk fizycznych odnoszących się do rozwiązywanego zadania, opisu tych zjawisk i przybliżeń jakie towarzyszą opisowi. Ma to szczególne znaczenie przy rozwiązywaniu zadań przepływu płynu rzeczywistego w kanałach zamkniętych.

W zbyt małym stopniu stosowane jest praktyczne wyciąganie wniosków z wiedzy, że powszechnie stosowane zależności były bądź wyprowadzone przy

daleko idących uproszczeniach lub że posiadają wprowadzone elementy (fragmenty) znalezione na drodze empirycznej, a więc ich pełna wiarygodność dotyczy tylko obszaru, w którym były sprawdzane doświadczalnie.

Wyprowadzona zależność na określenie wartości K_v w oparciu o badanie modeli z racji podanych powyżej przyczyn również wymaga rozważnego stosowania. Autor przeprowadzając badania różnych przepływowych elementów, takich jak zawory i przepustnice regulujące, zawory kulowe, zawory zwrotne i elementy odcinające armatury, filtry oraz odmulacze stosował nie tylko omówione powyżej zasady podobieństwa technicznego, ale i wyprowadzaną podstawową zależność wzbogacał o elementy korygujące.

Dla rozwiązywanego w opracowaniu zadania z doświadczeń autora wynikają poniżej wskazane główne przyczyny potrzeby rozbudowy wyprowadzonej zależności na K_v o elementy korygujące.

Należy pamiętać, że:

- określane są z założenia wartości K_v dla zbiorów wielkości tworzących typoszeregi. Wielkości w typoszeregach są zazwyczaj podobne pod względem kształtów, natomiast wybór powierzchni dla wolnego przepływu płynu i zachowanie pomiędzy nimi skali wymiarów, jak i rozkładu parametrów opisujących przepływający przez nie strumień płynu może nie w pełni być zachowywany,
- nie uwzględniane są zazwyczaj w wyprowadzanych zależnościach, na znalezienie kryterium podobieństwa, rozwiązywanego zadania wielkości fizyczne odgrywające drugorzędą rolę. Ich wpływ jednak może być znaczący szczególnie, gdy rozpatrujemy styk obowiązywania dominacji jedynych parametrów z dominacją innych, np. przy małych i dużych liczbach Reynoldsa,
- odchyłki w wynikach badań własnych na stanowisku badawczym, jak i odchyłki z wyników w badaniach przeprowadzonych w innych laboratoriach nie zawsze są zgodne.

Zazwyczaj wymienione powyżej powody są z sobą powiązane i wydzielenie dominującego dla przyjęcia lub znalezienia współczynnika korygującego zależy od wiedzy i doświadczenia badającego.

Uwzględnienie wszystkich odstępstw jest również niecelowe, gdyż prowadzi do nadmiernej rozbudowy wyprowadzonych zależności, która może zaciemnić dominacją najważniejszych parametrów i zwiększyć ryzyko pomyłek. W obliczeniach inżynierskich stawia pod znakiem zapytania ich praktyczne wykorzystywanie dla zróżnicowanych odmian tego samego zadania.

Zależność na K_v podana w p.5 ujmuje stosunek powierzchni dla przepływu decydujących o wartości strumienia objętości przepływu przez badany element.

Wybór decydującego np. najmniejszego przekroju dla przepływu jest trudny, gdyż względy konstrukcyjno-technologiczne wytwórcy powodują, że wartościom normalnym przyjmowanym z ciągów liczbowych, np. średnicy nominalnej na wlocie, wylocie oraz gniazda zawieradła przyporządkowane są wartości przekraczające tolerancje warsztatowe. Przykładem mogą być odstępstwa dochodzące do kilkunastu procent np. dla średnicy nominalnej DN 50 wynoszące na wlocie DN_{wl} 47 mm oraz DN_{wyl} 48 mm podane w danych technicznych dla wielkości z typoszeregu badanych elementów.

Zachowując podstawową postać wyprowadzonej w oparciu o kryteria podobieństwa zależności na K_v zadawalające wyniki – zgodne z wynikami badań uzyskano przy wprowadzeniu w miejsce ilorazu F_p/F_p' współczynnika korekcyjnego K_L .

$$K_L = \frac{F_p}{F_{pwl}} \cdot \frac{F_p}{F_{pwyl}} \cdot \frac{F_p}{F_p'}$$

Powoduje to zmianę wzoru na K_v , który dla takiego przypadku przybiera postać

$$K_v = K_v' \cdot K_L$$

Stosowany w praktyce opis doboru regulacyjnych elementów nastawczych opisany przez autora w [11] uzależniony jest od współczynnika K_v oraz parametrów fizycznych przepływającego płynu. W przypadku natomiast elementów armatury dla instalacji przepływowych stosowany w praktyce opis doboru uzależniony jest od współczynnika strat lokalnych ξ nazywanego również współczynnikiem strat miejscowych.

Współczynnik ξ ten dla przepływów $Re \geq 10^5$ wymaganych dla wyznaczenia doświadczalnego K_v wg. normy IEC60534-2-3 określić można z zależności podanej poniżej.

6.1. Określenie współczynnika strat lokalnych ξ i wykorzystanie go do korekcji.

Obliczenia każdej instalacji hydraulicznej powinny uwzględniać straty powodowane przez wszystkie elementy składowe instalacji. Do określenia wartości strat powodowanych przez omawiane w opracowaniu elementy nastawcze i armatury niezbędna jest znajomość współczynnika strat lokalnych ξ , nazywanego nieraz współczynnikiem strat miejscowych.

Współczynnik ten wyznacza się z zależności

$$\xi = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta p}{v^2 \cdot \gamma} = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v^2}$$

gdzie:

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – przyspieszenie ziemskie

Δp - różnica ciśnień, Pa

v - prędkość cieczy, m/s

γ - ciężar właściwy przepływającej cieczy, kG/m^3

ρ - gęstość cieczy, kg/m^3

Po przeliczeniu jednostek miary i podstawieniu za $v = Q_v/F$, a za Q_v określonych w znormalizowanych warunkach wartości K_{v_s} , otrzymamy:

$$\xi = 15,84 \cdot 10^8 \cdot F_p^2 / K^2 v_s$$

gdzie:

F_p - powierzchnia określona średnicą nominalną badanego elementu [m],

K_{v_s} - znormalizowany współczynnik przepływu [m^3/h],

Q_v - mierzony strumień objętości przepływającej cieczy [m^3/h].

Otrzymana z przekształceń zależność pozwala w zamienny sposób realizować dobór elementów regulacyjnych oraz armatury, bądź za pomocą współczynnika K_v lub współczynnika ξ .

Ponieważ zarówno K_v , jak i ξ wyznaczone są doświadczalnie przekształcona zależność na ξ służyć może jako uniwersalny parametr zbiorczo ujmujący wpływ szeregu czynników dla skorygowania np. określonych wartości współczynnika K_v w oparciu o przyjęcie za modele produkowanych i występujących w typoszeregu wielkości.

Skorygowanie parametrów opisujących rzeczywiście występujące wielkości do ich zgodności, jak dla modelu oparto o poparte wynikami doświadczeń stwierdzenia podane w [1], [4], [9], że dla odpowiednio dużych liczb Reynoldsa współczynnik strat lokalnych ma stałą wartość.

Podane stwierdzenie tłumaczone jest tym, że dla ustabilizowanego przepływu turbulentnego występuje zjawisko samomodelowania polegające na tym, że w przypadku gdy w skład układów badanych elementów o zmiennych kształtach i szerokości wchodzi krótkie ich długości w odniesieniu do rurociągów, do których są przymocowane to charakter przepływu ich współczynniki oporu nie ulegają zmianie.

Zarówno z przytaczanych danych z badań w wymienionych pozycjach literatury, jaki i znormalizowanych w skali międzynarodowej warunków wyznaczenia współczynnika K_v , a tym samym współczynnika ξ .

Za dolną granicę dla liczby Reynoldsa, przy której $\xi = \text{const}$ przyjęto podane w normie IEC 60534-2-3 zalecenie, że wyznaczania K_v powinno odbywać się przy przepływach o $Re \geq 10^5$.

Podana norma IEC 60544-2-3 jest nowelizacją normy IEC 534-2-3 wprowadzoną w grudniu 1997r. W poprzedniej edycji omawianej normy zalecano wartość $Re \geq 4 \cdot 10^4$.

Podane stwierdzenie pozornie odbiega od naszych doświadczeń i obiegowo przyjętych poglądów, że szczególnie dla małych wielkości średnic nominalnych badanych elementów zwiększa się wartość współczynnika strat.

Przeprowadzone badania wykazały, że w rzeczywistości mierzymy zwiększające się wartości współczynnika strat wraz ze zmniejszaniem średnic nominalnych badanych elementów.

Otrzymany wynik jest spowodowany przyczynami wynikającymi z przyjętego sposobu określania wartości ξ , jak wartości K_v i odchodzenia w coraz większym stopniu dla malejących wielkości badanych elementów od ścisłego spełnienia kryteriów podobieństwa.

I tak wraz ze zmniejszeniem się rzeczywiście występujących w typoszeregu produkowanych wielkości badanych elementów zmienia się skala między dwoma podstawowymi ich wymiarami – długością i średnicą wyrażaną ilorazem długości do średnicy odpowiednio dla modelu i obiektu, dla którego poszukujemy K_v lub ξ .

Równocześnie wraz ze zmniejszeniem się wielkości badanego jako model elementu zwiększa się względna chropowatość $e = k/DN$ lub $e = k/d$ będąca ilorazem bezwzględnej chropowatości k do średnicy przelotu dla wolnego przepływu strumienia płynu, dla której określamy ξ lub K_v .

Iloraz długości do średnicy oraz opis e i wartość liczby Reynoldsa są podstawowymi parametrami służącymi do wyznaczania dwóch współczynników opisujących mierzony współczynnik sumarycznych strat.

Wyznaczany współczynnik strat ξ jest uznawany jako współczynnik strat miejscowych ξ_M , gdyż dla podanych powyżej liczb Reynoldsa jest on dominujący. W rzeczywistości zaś $\xi = \xi_M + \xi_T$, gdzie: ξ_T jest współczynnikiem tarcia.

W sensie fizycznym ξ_T jest ilorazem wywołanego tarcia ubytku energii mechanicznej płynu i jego energii kinetycznej.

Natomiast współczynnik strat miejscowych ξ_M jest ilorazem wywołanego oporem miejscowym ubytku energii mechanicznej płynu i jego energii kinetycznej.

Błąd z przyjmowania, że $\xi \equiv \xi_M$ jak pokazuje doświadczenie zwiększa się wraz

Błąd z przyjmowania, że $\xi \equiv \xi_M$ jak pokazuje doświadczenie zwiększa się wraz ze wzrostem wartości ξ_T .

Przyjęcie wartości $\xi \equiv \xi_M$ i stałość wartości ξ dla odpowiednio dużych wartości liczby Reynoldsa umożliwia określenie poprzez przeliczenie wartości współczynnika K_v dla modelu zgodnego kryteriami podobieństwa jakie powinny być spełnione przez wielkości brane za modele z ich typoszeregu.

Określenie skorygowanej wartości współczynnika K_{v_m} modelu spełniającego kryteria podobieństwa wyznaczono uwzględniając stwierdzenie o stałości wartości ξ_M . Zachodzi wtedy zależność współczynnika strat miejscowych zgodnego z kryteriami podobieństwa modelu $\xi_{Mm} \equiv \xi_M$ i współczynnikiem strat miejscowych, który określony został w badaniach wielkości traktowanej, jako model, a w rzeczywistości odbiega od kryteriów podobieństwa jakie powinny być spełnione.

Wstawiając za ξ_{Mm} wyznaczoną wartość ξ_{sr} z przebadanych (2÷3) wielkości przy $Re > 10^5$ i wartości $\xi_{sr} \equiv \xi_M$ i K_v dla przebadanej wielkości nie spełniającej w pełni kryteriów podobieństwa można określić K_{v_m} .

Z zależności pomiędzy $\xi \equiv f(K_v)$ podanej w punkcie 6.1. otrzymamy, że wartość współczynnika K_v dla modelu spełniającego kryteria podobieństwa opisuje zależność:

$$K_{v_m} = K_v \sqrt{\xi_{sr} / \xi}$$

lub wyznaczyć wprost K_{v_m} z zależności $\xi = 15,84 \cdot 10^8 \cdot Fp^2 / K_{v_m}^2$.

Mając określone dla właściwego modelu wartości ξ_{sr} i K_{v_m} można zmodyfikować wielkość przyjmowaną z typoszeregu za model przez następujące zmiany.

Zmiany wymiarów DN lub d (rozwiercanie, tulejowanie) zmianą w sposób wymuszony chropowatości względnej e oraz współczynnika tarcia.

Należy jednak pamiętać, że wszystkie wyprowadzane zmiany są współzależne od siebie i od liczby Reynoldsa.

Współzależność głównych podanych parametrów ujmuje wzór H. Darcy'ego o postaci:

$$Qv^2 = \frac{\Delta p g \pi^2 d^5}{8 l_z \lambda}$$

gdzie: d może być równoważne DN a l_z długości badanego elementu lub długości pomiędzy punktami dla pomiaru Δp .

Natomiast λ może być określona z empirycznych zależności lub nomogramów dla omówionych parametrów. Wskazane jest posługiwanie się

znormalizowanymi zasadami zestawionymi w normie PN-76/M-34034 pt. „Zasady obliczeń start ciśnienia”, w której zamieszczony jest jako załącznik nomogram dla określenia λ wg. Colebrooka i White’a.

7. GRANICZNE WARTOŚCI STRUMIENIA OBJĘTOŚCI PRZY WYZNACZANIU WSPÓŁCZYNNIKA K_v .

7.1. Zakres granicy dolnej.

Prowadząc badania powinniśmy zdawać sobie sprawę, w jakim przedziale może zmienić się strumień objętości przy wyznaczeniu wartości K_v zgodnie z wymaganiami normy międzynarodowej IEC60544-2-3.

Przepływ minimalny przy pełnym otwarciu narzucony jest rozwiązaniem zawieradła i w praktyce może zmieniać się od prawie pełnego przesłonięcia – przesłony szczelinowe, do przelotu równej powierzchni przelotu rurociągów pomiędzy, którymi badany element jest zamocowany.

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że dla podanych przypadków mogli byśmy mieć przepływ laminarny lub przejściowy pomiędzy laminarnym i turbulentnym albo turbulentny, a nawet w przypadku przepływu gazów nadźwiękowy. Wiadomym jest, że wymienione przypadki przepływu opisywane są różnymi zależnościami.

By uniknąć niejednoznaczności w podanej powyżej normie międzynarodowej wprowadzono wymaganie, że minimalny dopuszczalny przepływ powinien występować przy liczbie Reynoldsa $Re = 10^5$ lub, że rekomendowane jest by badania były prowadzone przy $Re \geq 10^5$.

Z zależności opisującej liczbę Reynoldsa

$$Re = \frac{\rho v L}{\eta}$$

dla $L \equiv DN$, $Re = 10^5$, i $v = 4Q_{v_{min}}/\pi D^2$ otrzymano:

$$Q_{v_{min}} = \frac{10^5 \pi \eta DN}{4 \rho} \equiv A_T DN$$

gdzie:

$$A_T = \frac{\pi 10^5 \eta}{4 \rho} \quad \text{lub} \quad A_T = f(\eta_T)$$

Współczynnik lepkości dynamicznej w sposób znaczący zależy od temperatury T i można przyjąć, że ρ od niej w zadanym zakresie nie zależy.

Zgodnie z wymaganiami podanej normy dla wody w temperaturze $T = 5^\circ\text{C}$ $\rho = 999,9 \text{ kg/m}^3$, a $10^5 \eta = 154 \text{ kg/ms}$, zaś dla wody w temperaturze $T = 40^\circ\text{C}$ $\rho = 992,2 \text{ kg/m}^3$, a $10^5 \eta = 65,7 \text{ kg/m}^3 \text{ s}$ dolna granica $Q_{v\min}$ zawarta jest pomiędzy wartościami $A_{T=5^\circ\text{C}} \cdot \text{DN} \geq Q_{\min} \geq A_{T=40^\circ\text{C}} \cdot \text{DN}$.

Po doprowadzeniu do zgodności miar przeliczeniach i wyrażeniu $Q_{v\min}$ w m^3/h wyznaczone graniczne wartości dla $Q_{v\min}$ zestawiono w tabelicy podanej poniżej.

DN	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	400	500
Q_{\min} $T=5^\circ\text{C}$	4,4	6,5	8,7	10,9	13,9	17,4	21,8	28,3	34,8	43,5	54,4	65,3	87,0	109	131	174	218
Q_{\min} $T=40^\circ\text{C}$	1,9	2,8	3,7	4,7	6,0	7,5	9,4	12,2	15,0	18,7	23,4	28,1	37,4	46,8	56,1	74,9	93,6

7.2. Zakres dla granicy górnej.

Określono maksymalny strumień objętości jaki może przepłynąć przez badany element przy jego pełnym otwarciu i spełnieniu wymagań normy IEC 60534-2-3.

Przyjęto, że maksymalny strumień objętości przepływającej przez badany element nie może być większy od strumienia objętości jaki przepłynie przez gładką rurę wstawioną zamiast tego elementu.

Oczywiście długość i średnica rury powinna być równa odpowiednio długości i średnicy elementu oraz że rura jest gładka.

Zgodnie z wzorem H. Darcy'ego:

$$Q_{v\max}^2 \equiv Qv^2 = \frac{\Delta p g \pi^2 d^5}{8 \lambda l_z} \equiv 11,1 \text{ DN}^2 \frac{1}{\sqrt{\lambda l_z / \text{DN}}} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Obliczenia wykonano dla typowego typoszeregu produkowanych przez renomowane firmy zaworów kulowych o zredukowanym minimalnym przelocie opisanym przez średnią d przyjmującą gładką rurę o $k = 0,02 \cdot 10^{-3}$, $e = k/\text{DN}$ oraz l_z/DN wg. uśrednionych danych z katalogów renomowanych firm.

Wartości $Q_{v\max}$ obliczono dla $\Delta p = 10^5 \text{ Pa}$, $\text{Re} = 10^5$ i dla λ wyznaczonego z

DN [mm]	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200	250	300	350	400	500
d [mm]	10	10	15	20	24	31	39	50	65	80	100	125	150	200	250	-	-	-
l_z/DN	(8,5)	8,6	7,5	6,4	5,6	5,0	4,6	4,2	3,5	3,0	2,6	2,3	2,0	1,8	1,7	(1,7)	(1,7)	(1,7)
e	0,002	0,0013	0,001	0,0008	0,00063	0,0005	0,0004	0,0003	0,00025	0,0002	0,00016	0,00013	0,0001	0,00008	0,00007	0,00006	0,00005	0,00004
λ	0,0253	0,0235	0,0223	0,0215	0,0212	0,021	0,020	0,0195	0,0192	0,0190	0,0189	0,0186	0,0186	0,0186	0,0185	0,0184	0,0183	0,0182
Q max (m ³ /h)	8,57	19,99	39,09	67,34	118,76	197,33	329,41	590,03	986,68	1674,0	2817,0	4347,6	8288,5	13651	20282	27682	36256	56801

8. WNIOSKI.

Opracowanie ujmuje wyprowadzenie i dyskusję zależności dla określenia wartości współczynnika K_v w oparciu o badania modeli.

Określono kryteria podobieństwa i wyprowadzono wzory służące do obliczenia wartości współczynnika K_v . Podano zależności i zalecenia dla korygowania K_v w przypadkach gdy w pełni nie są zachowane kryteria podobieństwa.

Pozwala to stosować do wyznaczania wartości K_v nie wykonane na potrzeby badań modele, ale rzeczywiście występujące wielkości z wytwarzanych typoszeregów.

Efektem pracy jest opracowanie metody badań przy minimalnym koszcie ich wykonywania i określenia przy pomocy obliczeń wartości współczynnika K_v dla wielkości z całego typoszeregu w tolerancjach przyjętych w normach i przez czołowych producentów zagranicznych dla wyznaczenia K_v .

W załączniku podano przykłady praktycznego wykorzystania teorii podobieństwa w ujęciu, że określone w obliczeniach wartości zgodnie z wyprowadzonymi zależnościami były odnoszone do wyników badań własnych lub przeprowadzonych w zagranicznych Laboratoriach. Tym samym w sposób udokumentowany starano się pokazać możliwości uzyskania danych o nieznanymi wartościach parametrów obiektów w oparciu o badania ich modeli. Koszty tak przeprowadzonych badań są w przybliżeniu o tyle razy tańsze i możliwe do przeprowadzenia o ile razy mniej wielkości z typoszeregu nie jest doświadczalnie badana. Stwierdzono, że najlepsze rezultaty uzyskuje się przy zbadaniu doświadczalnym 3 do 4 wielkości rozłożonych jak 1 do 2 lub 2 do 2, przy początku i końcu wielkości z typoszeregu jakie mogą być przebadane na laboratoryjnym stanowisku.

9. LITERATURA.

1. Müller L.: Uderzenia hydrauliczne w rurociągach wodnych. Biuletyn Techniczny BPUPH., Gliwice Nr 5, 1955r.
2. Gałązka T.: Określenie charakterystyk przepustnic i ich przetwarzanie. Warszawa 1964 Biuletyn IMP 1/39.
3. Langhaar H.L.: Dimensional analysis and theory of models. New York 1950.
4. Muller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego. Warszawa 1961 WNT.
5. Piwinger F.: Stellgeräte and Armaturen für strömende stoffe. Düsseldorf 1971.
6. Sjedow L.J.: Metody podobija i rozmierności w mechanikie. Moskwa 1951.
7. Troskolański A.T.: Hydromechanika techniczna. Warszawa 1954 PWT.
8. Badanie modeli przepustnic regulacyjnych PRC dla średnic Dn200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 i 600 mm. PIAP 1978. Sprawozd. z pracy nb nr arch. 2479. Praca zbiorowa.
9. Prosnak W.J.: Mechanika Płynów. Warszawa 1970 PWN.
10. Gałązka T.: Określanie charakterystyk filtrów siatkowych na podstawie badań modelu. Biuletyn PIAP 1996 nr 1-2/183-184/96
11. Gałązka T.: Zasady doboru regulatorów o bezpośrednim działaniu ciągłym do instalacji ciepłowniczych. Warszawa 1994 Biuletyn PIAP 5-175/94.