

HENRYK WALDEN

WSPÓLCZYNNIK OPORÓW HYDRAULICZNYCH
W GAZOCIĄGACH DALEKOSIĘŻNYCH

ROZPRAWY
INŻYNIERSKIE
CC

TOM IX . ZESZYT 3 . ROK 1961

SPIS TREŚCI

1. Uwagi ogólne	443
2. Współczynnik oporów w rurach gładkich	445
3. Wzory do obliczeń współczynnika λ w strefie kwadratowej zależności oporów	446
4. Współczynnik oporów hydraulicznych w strefie przejściowej przepływu burzliwego	449
5. Wpływ dodatkowych czynników na opory w gazociągach	450

1. Uwagi ogólne. Wzory do obliczeń gazociągów dalekosiężnych wywodzą się z następującego ogólnego równania przepływu gazu, wyprowadzonego w pracy [1]:

$$(1) \quad Q = 103 \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) D^5}{\lambda \bar{\gamma} Z_{sr} LT} \right]^{0,5},$$

gdzie przyjęto następujące oznaczenia:

$Q[m^3/dob]$	wydatek objętościowy gazu przy $P_0 = 1kG/cm^2$ i $T_0 = 293^{\circ}K$,
P_1 i $P_2[kG/cm^2]$	ciśnienie początkowe i końcowe gazociągu,
$D[cm]$	wewnętrzna średnica gazociągu,
$L[km]$	długość gazociągu,
$T^{\circ}K$	bezwzględna temperatura gazu,
$\bar{\gamma} = \gamma/\gamma_p$	stosunek ciężarów właściwych gazu do powietrza,
Z_{sr}	średnia wartość współczynnika ściśliwości,
λ	współczynnik oporów liniowych.

Dokładność i zakres stosowalności tych wzorów zależą od precyzyjnych badań i odpowiedniego zastosowania współczynnika oporów λ w równaniu (1).

W pracy tej przeprowadzimy na podstawie badań własnych i innych autorów przegląd i analizę stosowanych w obliczeniach gazociągów dalekosiężnych zależności współczynnika λ od liczby Reynoldsa Re i wewnętrznej chropowatości względnej ε w zakresie przepływu burzliwego.

Znane w hydraulice krzywe Nikuradsego (rys. 1) $\lambda = f(Re, \varepsilon)$ wykreślono na podstawie doświadczalnych badań przepływu w rurach, charakteryzujących się jednorodną i równomierną chropowatością wewnętrznej powierzchni.

Według krzywych Nikuradsego minimum oporów hydraulicznych znajduje się w strefie II przejściowej. Natomiast w rurach technicznych o niejednorodnej chropowatości według krzywych Moody'ego (rys. 2) współczynnik oporów maleje ze wzrostem liczby Re osiągając minimum w strefie III kwadratowej zależności oporów.

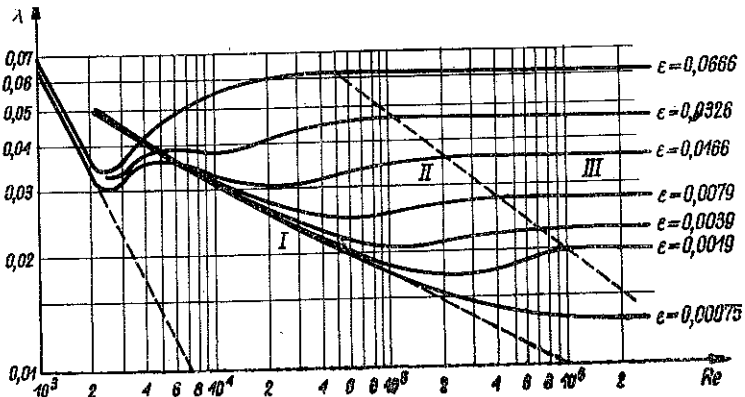
Na obu wykresach zakres przepływu burzliwego podzielono na 3 strefy:

Strefa I — przepływy w rurach hydraulicznie gładkich. W początkowym stadium turbulencji występy chropowatości wewnętrznej powierzchni rur zanurzone są całkowicie w laminarnej podwarstwie przyściennej.

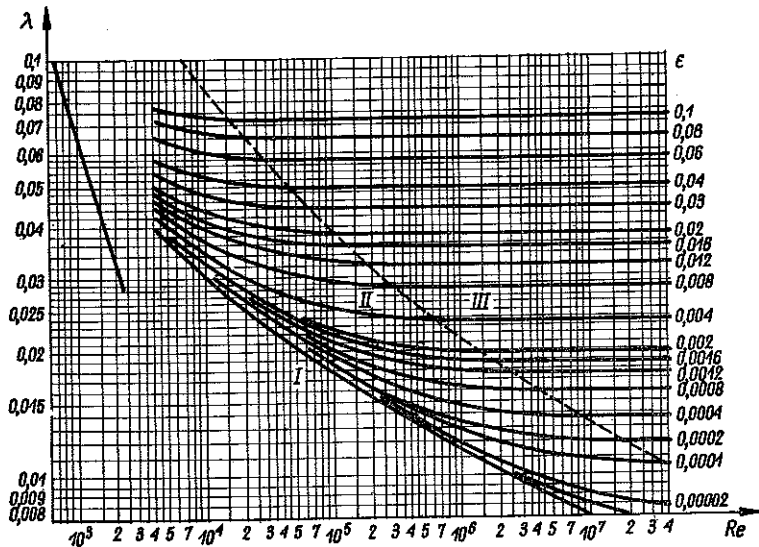
Strefa II — przejściowa. W miarę wzrostu liczby Re zwęża się coraz bardziej podwarstwa laminarna, spod której zaczynają się wynurzać występy chropowatości.

W obszarze tym maleje wpływ lepkości i wzrasta wpływ chropowatości na wielkość współczynnika oporów.

Strefa III kwadratowej zależności oporów charakteryzuje się całkowitym przepływem burzliwym. Zupełnie zanika laminarna podwarstwa przyścienna. Profil



Rys. 1



Rys. 2

chropowatości wewnętrznej opływany jest przez płyn z oderwaniem się strumienia i tworzeniem się wirów. W strefie tej współczynnik λ zależy wyłącznie od względnej chropowatości wewnętrznej ϵ .

2. Współczynnik oporów w rurach gładkich. W zakresie przepływu burzliwego w hydraulicznie gładkich rurach $\varepsilon = 0$ i współczynnik oporów λ zależy tylko od liczby

$$(2) \quad Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{\gamma Q D}{g F \mu} = \frac{4 \gamma Q}{\pi g D \mu},$$

gdzie Q [m³/sek] oznacza wydatek gazu, γ [kG/m³] ciężar właściwy, D [m] średnicę wewnętrzną przewodu, μ [kG sek/m²] współczynnik lepkości dynamicznej oraz g [m/sec²] przyspieszenie ziemskie.

PRANDTL i KÁRMÁN ustalili na podstawie doświadczalnych danych następującą zależność:

$$(3) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log (Re \sqrt{\lambda}) - 0,8.$$

Do praktycznych obliczeń bardziej dogodnie są następujące wzory empiryczne (opracowane na podstawie badań hydraulicznych w rurach gładkich):

Blasiusa dla zakresu liczb $2,3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$

$$(4) \quad \lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}};$$

Nikuradsego, [2], dla $10^5 \leq Re \leq 3,24 \cdot 10^6$

$$(5) \quad \lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}};$$

Filonienki, [3], dla $5 \cdot 10^3 \leq Re \leq 3,5 \cdot 10^6$

$$(6) \quad \lambda = 0,0042 + \frac{0,218}{Re^{0,25} - 2};$$

Murina, [4], dla $6 \cdot 10^3 \leq Re \leq 6 \cdot 10^5$

$$(7) \quad \lambda = \frac{1,01}{(\log Re)^{2,5}};$$

Konakowa, [5], dla całego zakresu liczb Re

$$(8) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,83 \log Re - 1,53.$$

Ponadto dla dużych wartości liczb $3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 10^9$ stosowany jest wzór

$$(9) \quad \lambda = \frac{0,0797}{Re^{0,14}}$$

oraz w zakresie $10^4 \leq Re \leq 10^7$

$$(10) \quad \lambda = \frac{0,1845}{Re^{0,2}}.$$

W wyniku badań doświadczalnych nad przepływem w nowych rurach otrzymano w pracy [6] zbliżoną do wzoru (4) Blasiusa empiryczną zależność dla liczb $3 \cdot 10^4 \leq \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$ w postaci

$$(11) \quad \lambda = \frac{0,43}{Re^{0,27}}$$

Wzory na λ dla rur gładkich mogą być stosowane do obliczeń gazociągów dalekosiężnych w przypadku, kiedy wewnętrzna powierzchnia nowych rur jest zupełnie gładka.

Własne badania chropowatości eksploatowanych gazociągów, [7], wykazały, że w warunkach przepływu suchego gazu, zawierającego drobny pył skalny, zachodzi pewnego rodzaju proces szlifowania i wygładzania wewnętrznej powierzchni rur. Również i w tym przypadku dopuszczalne jest stosowanie wzorów do obliczeń oporów w rurach gładkich.

3. Wzory do obliczeń współczynnika λ w strefie kwadratowej zależności oporów. W strefie kwadratowej zależności oporów rozważany jest przepływ burzliwy w rurach chropowatych, w których współczynnik λ nie zależy od liczby Re , a jest funkcją względnej chropowatości $\varepsilon = 2e/D$ (e [mm] oznacza bezwzględną chropowatość wewnętrzną).

Współczynnik oporów w tej strefie wyraża się wzorem Nikuradsego:

$$(12) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \frac{7,41}{\varepsilon}$$

Wartości ekwiwalentnej chropowatości bezwzględnej e rur stalowych w zależności od technologii ich produkcji, okresu eksploatacji oraz osadów i zanieczyszczeń wewnątrz przewodów podano w tablicy 1 na podstawie danych doświadczalnych, [7].

Tablica 1

Lp.	Rodzaje rur	e [mm]
1	Nowe rury stalowe (wewnątrz czyste)	0,02-0,07
2	Rury stalowe w eksploatacji	0,04-0,15
3	Stare rurociągi stalowe	0,4 -1,4

Według tablicy 1 zakres zmienności e w rurach stalowych mieści się w granicach od 0,02 do 1,4 mm. Chropowatość rur eksploatowanych zawarta jest w granicach od 0,04 do 0,15 mm.

Na podstawie najczęściej spotykanych w obliczeniach gazociągów dalekosiężnych wartości bezwzględnej chropowatości e oraz średnic wewnętrznych przewodów obliczono ε ze wzoru $\varepsilon = 2e/D$, a następnie ze wzoru (12) współczynnik λ . Wyniki obliczeń podano w tablicy 2.

Tablica 2

D w calach	D [mm]	e = 0,07 [mm]		e = 0,10 [mm]		e = 0,12 [mm]		e = 0,15 [mm]	
		$\varepsilon \cdot 10^6$	$\lambda \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^6$	$\lambda \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^6$	$\lambda \cdot 10^3$	$\varepsilon \cdot 10^6$	$\lambda \cdot 10^3$
1	25,4	5512	2,554	7874	2,827	9450	2,985	11812	3,196
2	50,8	2756	2,124	3937	2,332	4725	2,449	5906	2,604
3	76,2	1837	1,923	2624	2,099	3150	2,200	3937	2,335
4	101,6	1378	1,796	1969	1,956	2362	2,045	2953	2,164
5	127,0	1101	1,706	1575	1,853	1890	1,936	2362	2,044
6	152,4	921	1,638	1312	1,775	1575	1,854	1969	1,956
7	177,8	787	1,584	1125	1,714	1351	1,788	1686	1,884
8	203,2	689	1,537	984	1,663	1181	1,734	1476	1,825
10	254,0	551	1,467	787	1,584	945	1,649	1181	1,734
12	304,8	459	1,411	656	1,522	787	1,583	983	1,663
15	381,0	367	1,350	525	1,451	630	1,509	787	1,583
20	508,0	276	1,274	394	1,368	473	1,421	591	1,488

Z tablicy tej można wybrać odpowiednią wartość współczynnika λ w zależności od chropowatości względnej ε .

Do praktycznych obliczeń stosowane są wzory przybliżone, w których występuje funkcja potęgowa:

$$(13) \quad \lambda = Ce^n,$$

przy czym C i n są to wielkości stałe.

Dla przedziału $0,0001 \leq \varepsilon \leq 0,001$ otrzymano w pracy [1] wzór

$$(14) \quad \lambda = 0,0587\varepsilon^{0,1858}.$$

Zależność (14) wykorzystano we wzorze stosowanym do obliczeń gazociągów dalekosiężnych w strefie kwadratowej zależności oporów dla $Re > 10^7$:

$$(15) \quad Q = \frac{426}{\varepsilon^{0,093}} D^{2,5} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{\gamma Z_{sr} LT} \right)^{0,5}.$$

Dla innych przedziałów ε mamy następujące wzory na λ :

$$(16) \quad 0,001 \leq \varepsilon \leq 0,004, \quad \lambda = 0,0873\varepsilon^{0,24},$$

$$(17) \quad 0,004 \leq \varepsilon \leq 0,02, \quad \lambda = 0,116 \varepsilon^{0,29},$$

$$(18) \quad 0,0008 \leq \varepsilon \leq 0,007, \quad \lambda = 0,0933\varepsilon^{0,25}.$$

Stopień dokładności tych wzorów w stosunku do równania (12) mieści się w granicach od 1 do 5% błędu.

Wzór (13) można przedstawić w postaci:

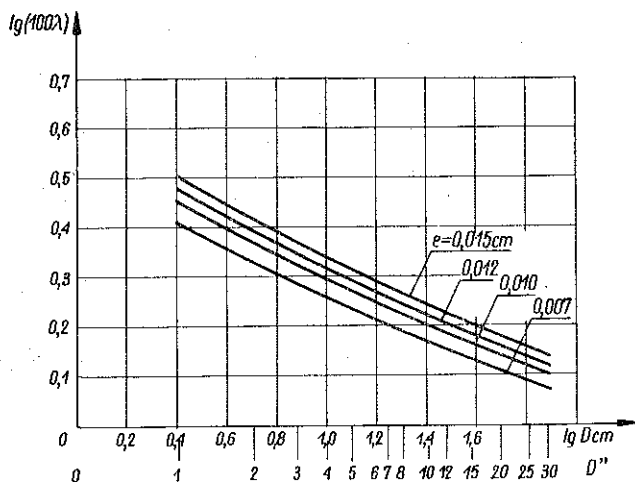
$$(19) \quad \lambda = C \left(\frac{2e}{D} \right)^n.$$

Dla danej wartości bezwzględnej chropowatości e otrzymamy następującą zależność współczynnika λ od wewnętrznej średnicy D :

$$(20) \quad \lambda = \frac{C_1}{D^n},$$

gdzie $C_1 = C(2e)^n$. (D oraz e wyrazić należy w cm).

Na podstawie danych z tabelicy 2 wykreślono w układzie logarytmicznym krzywe zależności λ od D dla różnych wartości e .



Rys. 3

W zakresie przyjętych średnic krzywe mogą być aproksymowane prostymi odciinkami.

Przedstawiając wzór (20) w postaci logarytmicznej $\log(100\lambda) = \log(100C_1) - n \log D$ wyznaczmy z wykresów $\log(100C_1)$ i n , a następnie w wyniku prostych przekształceń otrzymamy następujące zależności:

$$(21) \quad \text{dla } e = 0,007 \text{ cm,} \quad \lambda \approx \frac{0,0112}{D^{0,23}},$$

$$(22) \quad e = 0,01 \text{ cm,} \quad \lambda \approx \frac{0,0113}{D^{0,23}},$$

$$(23) \quad e = 0,012 \text{ cm,} \quad \lambda \approx \frac{0,0114}{D^{0,23}},$$

$$(24) \quad e = 0,015 \text{ cm,} \quad \lambda \approx \frac{0,0115}{D^{0,23}}.$$

Przybliżone wzory od (21) do (24) nieznacznie różnią się od siebie w przedziale bezwzględnej chropowatości wewnętrznej eksploatowanych gazociągów $0,007 \leq e \leq 0,015$ cm.

Przykładem zastosowania zależności λ od D jest wzór Weymoutha

$$(25) \quad \lambda = \frac{0,0094}{D^{1/3}}.$$

Przyjmując zależność (25) w ogólnym równaniu przepływu (1) i przyjmując $Z_{sr} = 1$, otrzymamy wzór Weymoutha do obliczenia gazociągów dalekosiężnych:

$$(26) \quad Q = 493,33 D^{8/3} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{\gamma L T} \right)^{0,5}.$$

Wzory typu $\lambda = f(D)$ dają dokładne wyniki tylko dla określonej wartości bezwzględnej chropowatości e w zakresie przyjętych w badaniach doświadczalnych średnic wewnętrznych D gazociągów. Dla innych wartości e i D mogą one doprowadzić do poważnych błędów.

4. Współczynniki oporów hydraulicznych w strefie przejściowej przepływu burzliwego. Strefa przejściowa najbardziej odpowiada warunkom przepływu w gazociągach dalekosiężnych.

W strefie tej współczynnik $\lambda = f(Re, e)$.

W przypadku równomiernej chropowatości powierzchni wewnętrznej zgodnie z krzywymi na rys. 1 znany jest wzór Nikuradsego

$$(27) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = a + b \log (Re \sqrt{\lambda}) + c \log e,$$

gdzie a , b i c są to stałe, mające różne wartości dla różnych zakresów liczb Re .

Opory w rurach technicznych o niejednorodnej chropowatości określone są następującymi wzorami Colebrooka i White'a

$$(28) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{e}{7,41} \right).$$

Wzór ten daje asymptotyczne przybliżenie do prawa oporów w rurach gładkich i zupełnie chropowatych oraz obejmuje zależności λ od Re i e w całym obszarze przepływu burzliwego. Brakiem tego wzoru jest to, że współczynnik λ nie daje się wyznaczyć bezpośrednio, a tylko metodą kolejnych przybliżeń.

L. MOODY, [8], opracował krzywe (rys. 2) zależności λ od Re i e w rurach o niejednorodnej chropowatości na podstawie wzoru:

$$(29) \quad \lambda \approx 0,0055 \left[1 + 10 \left(10e + \frac{10^8}{Re} \right)^{1/3} \right].$$

Autor pracy [6] otrzymał uogólniony wzór, z którego można bezpośrednio obliczyć współczynnik λ dla całego zakresu przepływu burzliwego:

$$(30) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \left(\log \frac{6,1}{Re^{0,915}} + 0,134e \right).$$

Równanie (30) sprowadza się przy $\varepsilon \rightarrow 0$ do wzoru Konakowa (8) dla rur gładkich, a przy $Re \rightarrow \infty$ do wzoru Nikuradsego (12) dla rur zupełnie chropowatych. W wymienionej pracy wykazana została całkowita zgodność wzoru (30) z doświadczeniami własnymi oraz Nikuradsego, Colebrooka i White'a oraz Murina.

W szeregu przypadków otrzymuje się w strefie przejściowej zadowalające wyniki obliczeń współczynnika λ w zależności od liczby Re przy danej wartości współczynnika względnej chropowatości ε .

Na podstawie eksperymentalnych badań oporów w gazociągach opracowano następujące wzory:

Drew i Genereaux, [9],

$$(31) \quad \lambda = \frac{0,1206}{Re^{0,15}};$$

Chodanowicza, [10],

$$(32) \quad \lambda = \frac{0,224}{Re^{0,185}};$$

autora, [1],

$$(33) \quad \lambda = \frac{0,177}{Re^{0,17}}.$$

Ostatnie trzy zależności wykorzystano do wyprowadzenia wzorów do obliczeń gazociągów dalekosiężnych:

zależność (31) we wzorze Panhandle'a

$$(34) \quad Q = \frac{704}{\gamma^{0,431}} D^{2,618} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{Z_{sr} LT} \right)^{0,5394};$$

zależność (32) we wzorze Chodanowicza

$$(35) \quad Q = 602 D^{2,653} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{\gamma Z_{sr} LT} \right)^{0,571};$$

zależność (33) we wzorze autora

$$(36) \quad Q = \frac{655}{\gamma^{0,454}} D^{2,04} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{Z_{sr} LT} \right)^{0,546}.$$

5. Wpływ dodatkowych czynników na opory w gazociągach. Przy wyznaczaniu całkowitych oporów należy uwzględnić wpływ dodatkowych czynników zachodzących w procesie eksploatacji magistrał gazociagowych. W obliczeniach hydraulicznych pomijane są zazwyczaj straty energetyczne, wywoływane oporami miejscowymi w zaworach, złączach, zakrzywieniach przewodu itd. Opory miejscowe są stosunkowo nieduże. Jednak mogą one wpłynąć na zwiększenie współczynnika λ . W obliczeniach współczynnika oporów nie uwzględnia się również tak specyficz-

ных явлений zachodzących в czasie eksploatacji gazociągów, jak tworzenie się osadów, różnego rodzaju zanieczyszczenia i proces korozji wewnętrznej. Czynniki te wpływają в sposób istotny на zwiększenie chropowatości wewnętrznej, а tym samym powodują wzrost współczynnika oporów hydraulicznych. Wszystkie przytoczone wyżej czynniki mogą być uwzględnione tylko drogą eksperymentalnych badań współczynnika oporów λ i względnej chropowatości ϵ .

Literatura cytowana в текście

- [1] H. WALDEN, *Nowe wzory do obliczeń gazociągów dalekosieżnych*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 3, 1954.
- [2] I. NIKURADSE, *Untersuchungen über die Geschwindigkeitsverteilung in turbulenten Strömungen*, VDI Forsch, Heft 35b, 1932.
- [3] Г. ФИЛОНЕНКО, *Формула для коэффициента гидравлического сопротивления гладких труб*, Изв. ВТИ, 10, 1948.
- [4] Г. МУРИН, *Гидравлическое сопротивление стальных труб*, Изв. ВТИ, 10, 1948.
- [5] П. КОНАКОВ, *Коэффициент сопротивления для гладких труб*, Изв. АН СССР ОТН, 7, 1948.
- [6] H. WALDEN, *Badanie współczynnika oporów hydraulicznych w rurach technicznych w zakresie przepływu burzliwego*, Zesz. Nauk. PW: Budownictwo, 14, 1960.
- [7] H. WALDEN, *Badanie przepływu gazu w chropowatych gazociągach*, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 4, 1954.
- [8] L. MOODY, *Friction Factors for Pipe Flow*, Trans. of the ASME Nov. 1944.
- [9] T. DREW, R. GENEREAUX, *Trans. Am. Inst. Chem. Eng.*, 32, 17 (1936).
- [10] И. ХОДАНОВИЧ, *О численных значениях коэффициентов сопротивления в магистральных газопроводах. Вопросы добычи, транспорта и переработки природных газов*, ВНИИ Госстоп-Техиздат, Москва-Ленинград 1951.

Резюме

КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

На основании собственных исследований и исследований других авторов проводится обзор и анализ применяемой в расчетах магистральных газопроводов зависимости коэффициента гидравлических сопротивлений от числа Рейнольдса и внутренней относительной шероховатости в области турбулентного течения.

Коэффициент сопротивления в гладких трубах определяется для различных значений числа Рейнольдса по известным в гидравлике формулам, а также по эмпирической очень приближенной к зависимости Блазиуса — формуле определенной автором.

В переходной зоне турбулентного течения дается наряду с формулами Никурадзе, Колбрука и Уайта и Муда обобщенная, собственная формула автора для определения коэффициента сопротивлений.

Для практического определения коэффициента сопротивления в зоне квадратичной зависимости, следует применять формулу в виде степенной функции, хотя и не столь точную, но по сравнению с формулой Никурадзе в расчетах более удобную.

Summary

THE COEFFICIENT OF HYDRAULIC RESISTANCE IN LONG-RANGE GAS PIPE LINES

On the basis of the research of the present and other authors the dependence of the coefficient of hydraulic resistance on the Reynolds number and the inner wall roughness is analysed for turbulent flow in long range gas pipe lines.

The coefficient of resistance in smooth tubes is determined for various ranges of the Reynolds number from known hydraulic equations and from the present author's empirical formula approaching the Blasius equation.

In the transitory zone of the turbulent flow the author gives, besides of the equations of Nikuradse, Colebrook and White, Moody, his own generalized equation for the determination of the coefficients of resistance.

For practical computations of the coefficients of resistance in the zone of quadratic dependence, a power equation should be applied which is equally accurate but more convenient.

ZAKŁAD MECHANIKI CIECZY I GAZÓW
IPPT PAN

Praca została złożona w Redakcji dnia 31 stycznia 1961 r.
