

STRATY CIŚNIENIA W RUROCIĄGACH ZE SZKŁA TECHNICZNEGO

W opracowaniu podano podstawowe właściwości szkła borowo-krzemowego, jego odporność na działanie wody, kwasów i zasad oraz jego wytrzymałość. Przeanalizowano wzory do obliczeń współczynnika tarcia i dokonano wyboru wzoru do wyznaczania jednostkowych strat ciśnienia w rurociągach ze szkła, na podstawie którego opracowano nomogram.

Podano współczynniki miejscowych strat ciśnienia kształtek ze szkła oraz współczynniki przeliczeniowe dla cieczy o różnych cechach fizycznych.

Rurociągi ze szkła technicznego są powszechnie stosowane w przemysłach: chemicznym, farmaceutycznym i spożywczym. Ze względu na wysoką ich odporność na działanie roztworów kwaśnych i zasadowych, zaleca się ich stosowanie także w zdrownictwie, zwłaszcza do przesyłania silnie agresywnych wód mineralnych [1, 2, 3, 4].

W celu ułatwienia doboru średnic rurociągów oraz określenia zachodzących w nich strat ciśnienia, podano w niniejszym opracowaniu zasady obliczeń hydraulicznych rurociągów ze szkła technicznego. Na podstawie podanych materiałów można również określić wstępnie średnicę i straty ciśnienia w rurociągach z tworzyw sztucznych (utwardzone PCW lub PE), gdyż rury te, podobnie jak ze szkła, zaliczyć można do grup rur hydraulicznie gładkich.

Szkło borowo-krzemowe

W technice uzdrowiskowej poleca się stosowanie szkła borowo-krzemowego, w szczególności szkła Termisil produkcji krajowej oraz Simax produkcji czechosłowackiej. Wyroby ze szkła Termisil są zbliżone właściwościami fizycznymi do szkła Simax, będącego jednym z lepszych w świecie. Szkło borowo-krzemowe wykazuje wysoką odporność na działanie związków organicznych, wody, kwasów i zasad, z wyjątkiem kwasu fluorowodorowego, fosforowego i silnych związków alkalicznych. Rurociągi z tego szkła, o grubości ścianek 3-6 mm odporne są na krótkotrwałe ciśnienie (1s) do 100 MPa (1000 kG/cm²) oraz długotrwałe ciśnienie (400 h) do 35 MPa (350 kg/cm²).

Do celów praktycznych miarodajna jest wytrzymałość na ciśnienie długotrwałe. Współczynnik bezpieczeństwa zaleca się przyjmować w granicach 5—10, stąd dopuszczalne ciśnienie w rurociągach może wynosić: 3,5—7,0 MPa (35—70 kG/cm²).

Szkło, podobnie jak inne materiały zmienia wraz z temperaturą swoją objętość. Wartość tej zmiany

określa współczynnik rozszerzalności cieplnej. W praktyce zachodzi najczęściej zmiana długości i dlatego najbardziej przydatna jest znajomość średniego współczynnika rozszerzalności liniowej. Zmianę długości można określić z zależności:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta t \quad (1)$$

Jak z tej zależności wynika, zmiana długości przewodu nie zależy od jego średnicy, zależy natomiast od jego długości i różnicy temperatur między temperaturą stanu początkowego a temperaturą obliczeniową czynnika transportowanego w rurociągach. W zakresie temperatur 20—300°C wartość współczynnika α_1 można przyjąć jako równą

$$\alpha = (32-33) \cdot 10^{-7} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

Temperatura robocza czynnika transportowanego rurociągiem nie powinna przekraczać 180°C. Do temperatury roboczej należy dostosować materiał uszczelniający. W razie przekraczania temperatury 100°C przez czynnik transportowany należy unikać gwałtownych ochłodzeń rurociągu. Zalecane zmiany temperatur powinny się mieścić w zakresie 90—120°C.

Wielkość ciśnienia roboczego jest zależna od temperatury czynnika i od średnicy rurociągu. Dla temperatury do 120°C zaleca się następujące ciśnienie dla średnic: 25 i 50 mm do 0,3 MPa (3 kG/cm²), 80 i 100 mm do 0,2 MPa (2 kG/cm²), 150 mm do 0,15 MPa (1,5 kG/cm²).

Spadki ciśnienia w rurociągach ze szkła technicznego

W celu ułatwienia doboru średnic rurociągów oraz określenia zachodzących w nich spadków ciśnienia podano poniżej zasady obliczeń rurociągów ze szkła technicznego.

Straty ciśnienia w rurociągu wywołane są oporami przepływu czynnika przez odcinek prosty oraz przez elementy miejscowe rurociągu

$$\Delta h = \Sigma(\Delta h_s \cdot l + \Delta h_m) \quad (2)$$

Straty ciśnienia wywołane oporami przepływu czynnika przez odcinek prosty rurociągu możemy określić wzorem Darcy'ego — Weissbacha (dla $l=1\text{m}$):

$$\Delta h_s = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \text{ Pa/m} \quad (3)$$

Współczynnik tarcia jest uzależniony od charakteru przepływu (laminarny, przejściowy lub burzliwy), którego miernikiem jest liczba Reynoldsa oraz względna chropowatość rury.

$$\lambda = f(Re, e) \quad (4)$$

Przy przepływie burzliwym, ustabilizowanym ($Re > 4000$), jaki będzie występować w rozpatrywanych rurociągach ze szkła ($d > 25 \text{ mm}$), rury te będzie można uznać za hydraulicznie gładkie [12, 13], jeżeli ich względna chropowatość jest mniejsza lub równa wartości granicznej określonej wzorami: — Altszula — Filonienki (dla chropowatości równomiernej)

$$e_{gr} = \frac{18l_g Re - 16,4}{Re} \quad (5)$$

lub dla $Re \leq 10^5$ wzorem Blasiusa

$$e_{gr} = \frac{17,85}{Re^{0,875}} \quad (6)$$

— Altszula — Lecera (dla chropowatości nierównomiernej)

$$e_{gr} = \frac{23}{Re} \quad (7)$$

Na podstawie analizy rzeczywistych i granicznych chropowatości rur określonych zależnościami (5), (6) i (7) stwierdzono że rury ze szkła technicznego należą do grupy rur hydraulicznie gładkich. Dla tych rur normy [12, 13] zalecają stosowanie wzoru Prandtla — Karmana.

$$\lambda = \left(2 \lg \frac{\sqrt{\lambda} \cdot Re}{2,51} \right)^2 \quad (8)$$

Wzór ten ze względu na uwikłaną jego postać jest niewygodny do praktycznego stosowania. Na podstawie analizy przepływu wody zimnej ($+10^\circ\text{C}$) w rurach ze szkła o średnicach 25—150 mm stwierdzono, że dla prędkości przepływu w zakresie 0,2—2 m/s można stosować do obliczeń wzór Blasiusa ($Re \leq 10^5$), który ma prostą postać:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (9)$$

Jedynie w zakresie liczb Reynoldsa $Re = 10^5$ — $2 \cdot 10^5$ wartości współczynnika tarcia λ określone wzorem Blasiusa będą nieznacznie mniejsze (do 4%) od wartości określonej ze wzoru (8). Prze-

kształcając zależność (3) drogą podstawienia zamiast prędkości przepływu, masowego natężenia przepływu gdy

$$w = \frac{4G}{3,14 \cdot \rho \cdot d^2} \quad (10)$$

$$w^2 = \left(\frac{4}{3,14} \right)^2 \cdot \frac{G^2}{\rho^2 \cdot d^4} \quad (11)$$

otrzymamy postać wzoru Darcy'ego—Weissbacha

$$\Delta h_s = \left(\frac{4}{3,14} \right)^2 \cdot \frac{\lambda}{2\rho^2} \cdot \frac{G^2}{d^5} \text{ Pa/m} \quad (12)$$

Wartość współczynnika tarcia rur podanego w zależności (9) można również odnieść do masowego natężenia przepływu, przekształcając liczbę Reynoldsa do postaci:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{4}{3,14} \cdot \frac{G}{d \cdot \rho \cdot \nu} \quad (13)$$

$$Re^{0,25} \left(\frac{4}{3,14} \right)^{0,25} \left(\frac{G}{d \cdot \rho \cdot \nu} \right)^{0,25} \quad (14)$$

Wartość współczynnika tarcia można zatem wyznaczyć ze wzoru:

$$\lambda = 0,3164 \cdot \left(\frac{3,14}{4} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{d}{G} \right)^{0,25} \cdot \rho^{0,25} \cdot \nu^{0,25} \quad (15)$$

Podstawiając wzór (15) do zależności (12) otrzymamy:

$$\Delta h_s = 0,24165 \cdot \frac{G^{1,75}}{d^{4,75}} \cdot \frac{\nu^{0,25}}{\rho^{0,75}} \quad (16)$$

Za podstawowy czynnik przepływający przez rurociąg przyjęto wodę ($t=10^\circ\text{C}$, $\rho=999,6 \text{ kg/m}^3$, $\nu=1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), do której odnosić można rzeczywiste rodzaje przetwarzanych cieczy. Dla wody o temperaturze $+10^\circ\text{C}$ zależność (16) przyjmuje postać ($\nu^{0,25}=0,03383$, $\rho^{0,75}=177,775$):

$$\Delta h_s = 4,6 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{G^{1,75}}{d^{4,75}} \text{ Pa/m} \quad (17)$$

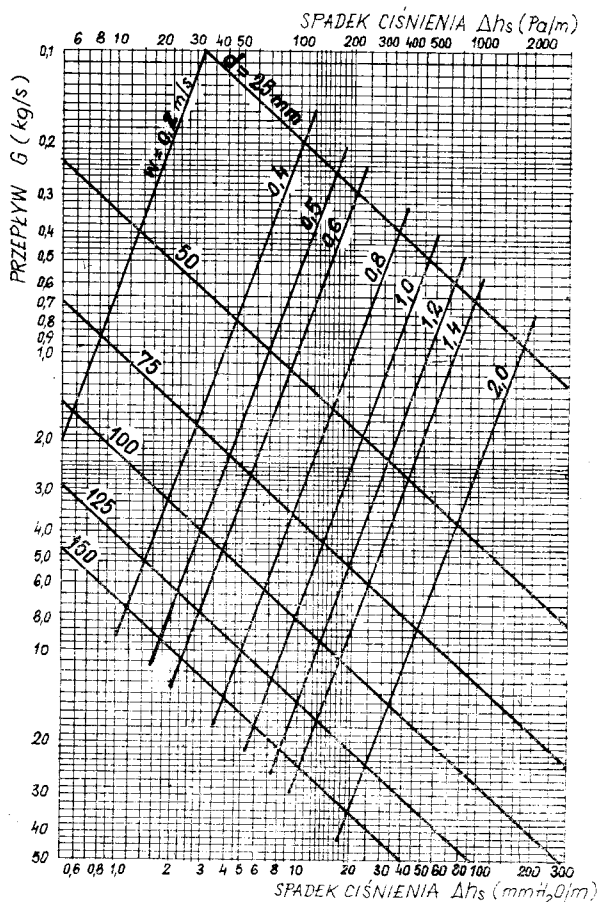
Aby ułatwić korzystanie z powyższych wzorów, opracowano nomogram (rys. 1) w układzie współrzędnych Δh_s — G .

Straty ciśnienia wywołane oporami przepływu czynnika przez elementy rurociągu, nazywane stratami miejscowymi, określa się ze wzoru:

$$\Delta h_m = \Sigma \xi \cdot \frac{w^2 \cdot \rho}{2} \text{ Pa} \quad (18)$$

Wartość współczynników oporów miejscowych dla podanych w katalogach [2, 3] kształtek, określone na podstawie piśmiennictwa [9, 12, 13] zestawiono w tabeli 1. W celu ułatwienia obliczeń w tabeli 2 podano wartość ciśnienia dynamicznego

$$\frac{w^2 \cdot \rho}{2}$$



Rys. 1 Jednostkowe straty ciśnienia w rurociągach ze szkła.

Tabela 1
WSPÓŁCZYNNIKI MIEJSCOWYCH STRAT CIŚNIENIA KSZTAŁTEK ZE SZKŁA

Rodzaj kształtki		Średnice wewnętrzne (mm)					
		25	50	75	100	150	25-150
Kolano 90°	R/d	2	2	2	1,2	1,2	—
	r_{gr}	0,25	0,23	0,21	0,22	0,23	—
Kolano 180°	R/d	3	2	1,5	1,2	1,2	—
	r_{gr}	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	—
Kolano	15°	—	—	—	—	—	0,04
	30°	—	—	—	—	—	0,05
	45°	—	—	—	—	—	0,12
Trójkąt	Ga:G=0,5	—	—	—	—	—	0,30
	Ga:G=1	—	—	—	—	—	0,10
Trójkąt — Odgałęzienie		—	—	—	—	—	—
Gb:G=0,5-1		—	—	—	—	—	1,1
Odsadzki l:d=1	—	—	0,25	—	0,25	—	—
	1,33	—	—	0,30	—	0,30	—
	2	0,40	0,40	—	0,40	—	—
	3-4	0,45	0,45	0,45	—	—	—
Zwężenie przekroju $f_1:f_2$	0,25	0,40	—	—	—	—	—
	0,33	0,33	0,33	—	—	—	—
	0,50	0,25	0,25	0,25	—	—	—
	0,66	0,18	0,18	—	0,18	—	—
Rozszerzenie przekroju $f_1:f_2$	4	1,0	—	—	—	—	—
	3	1,0	1,0	—	—	—	—
	2	1,0	1,0	1,0	—	—	—
	1,33	0,15	0,15	—	0,15	—	—

Obliczając spadki ciśnienia w rurociągach, przy przepływie innych rodzajów cieczy niż woda, należy wprowadzać współczynniki poprawkowe, uwzględniające cechy fizyczne cieczy. Wówczas wzór (2) do określania strat ciśnienia w rurociągu będzie miał następującą postać:

$$\Delta h_c = \sum (\Delta h_s \cdot l \cdot C_1 \cdot C_2 + \Delta h_m \cdot C_3) \quad (19)$$

Tabela 2

WARTOŚĆ CIŚNIENIA DYNAMICZNEGO $\frac{w^2 \cdot \rho}{2}$ (PA) DLA WODY
O TEMPERATURZE $+10^\circ\text{C}$ ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$) I PRĘDKOŚCI PRZEPŁYWU
W ZAKRESIE 0 — 2,9 m/s

Prędkość m/s	.0	.1	.2	.3	.4
0	0	5	20	45	80
1	500	605	720	845	980
2	2000	2205	2420	2645	2880

c.d. tab. 2

Prędkość m/s	.5	.6	.7	.8	.9
0	125	180	245	320	405
1	1125	1280	1445	1620	1805
2	3125	3380	3645	3920	4205

Wartość współczynników poprawkowych można określić z zależności

$$C_1 = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{0,25} = \left(\frac{v_2}{1,31 \cdot 10^{-6}} \right)^{0,25} \quad (20)$$

$$C_2 = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{0,75} = \left(\frac{Q_2}{999,6} \right)^{0,75} \quad (21)$$

$$C_3 = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) = \frac{Q_2}{999,6} \quad (22)$$

Straty ciśnienia w rurociągach ze szkła są ok. 4—5 krotnie mniejsze od strat ciśnienia w rurociągach stalowych lub azbestowo-cementowych. Z tego względu zalecane w normie [19] prędkości przepływów mogą być w instalacjach ze szkła 2—3 krotnie przekraczane.

OZNACZENIA

- d — wewnętrzna średnica rury, m
- e — względna chropowatość rury, —
- e_{gr} — graniczna chropowatość rury, —
- f_1, f_2 — pole przekroju rury, m^2
- g — normalne przyspieszenie ziemskie, m/s^2
- l — długość rurociągu, m
- l_0 — długość pierwotna, m
- w — prędkość przepływu, m/s
- C_1, C_2, C_3 — współczynniki poprawkowe, —
- G — przepływ masowy, kg/s
- R — promień krzywizny kolana, łuku, m
- Re — liczba Reynoldsa, —
- Δh — całkowita strata ciśnienia w rurociągu dla wody o temp. $+10^\circ\text{C}$, Pa
- Δh_c — całkowita strata ciśnienia w rurociągu dla projektowanego czynnika, Pa
- Δh_m — strata ciśnienia na oporach miejscowych, Pa
- Δh_s — jednostkowa strata ciśnienia na odcinku prostym rury, Pa/m
- Δl — różnica długości, m
- Δt — różnica temperatur, K
- α_1 — średni liniowy współczynnik rozszerzalności cieplnej, —
- ρ — gęstość cieczy, kg/m^3
- λ — współczynnik tarcia rury, —
- ν — kinematyczny współczynnik lepkości, m^2/s
- ξ — współczynnik miejscowych strat ciśnienia, —

LITERATURA

1. A.D. ALTSZUL: Gidrawliczeskije potieri na trenija w truboprowodach. Gasseniergoizdat, Moskwa 1963.
2. Katalog firmy Kavalier. Skloexport A.S. Liberec (CSRS).
3. Katalog szklanej aparatury przemysłowej. Huta Szkła im. F. Paplińskiego w Wołominie, 1968.
4. Katalog szkła laboratoryjnego. Zjednoczenie Przemysłu Szklarskiego, Sosnowiec 1971.
5. A. MADEYSKI: Rurociągi ze szkła. GWiTS, 1956, nr 11.
6. L. JASTRZĘBSKI, A. MADEYSKI, I. POTOCKI: Podstawy balneotechniki. Arkady, Warszawa 1965.
7. A. MADEYSKI: Urządzenia sanitarno-techniczne w uzdrowiskach. Arkady, Warszawa 1965.
8. A. MADEYSKI: Poradnik balneotechnika. Zarząd Główny PZiTS nr 127, Warszawa 1972.
9. W. SUROWIAK: Rurociągi z tworzyw sztucznych. Arkady, Warszawa 1963.
10. P.G. UDYMA: Korrozzionnostojkije truboprowody iz niemetallicznych materialow. Goschimizdat, Moskwa 1963.
11. M. ZIOŁO: Instalacje rurociągowie w przemyśle chemicznym. WNT, Warszawa 1969.

NORMY

12. PN-76/M-34034 Rurociągi. Zasady określania strat ciśnienia.
13. PN-70/M-34043 Rurociągi. Zasady określania strat ciśnienia.
14. PN-61/C — 13003 Szklany sprzęt laboratoryjny. Wspólne wymagania i badania.
15. PN-66/S — 13063 Badania odporności szkła i wyrobów szklanych na zmiany temperatury.
16. PN-58/C-13120 Odporność chemiczna szkła. Oznaczenie odporności szkła na działanie wody.
17. PN-59/C-13121 Odporność chemiczna szkła. Oznaczenie odporności szkła na działanie kwasów.
18. PN-59/C-13122 Odporność chemiczna szkła. Oznaczenie odporności szkła na działanie zasad.
19. BN-76/9563-01 Instalacje wody leczniczej. Wymagania podstawowe.