

## Wnikanie ciepła przy przepływie wymuszonym przez kanały

Korelacje opisujące wymianę ciepła płynu przemieszczającego się kanałem zamkniętym są najczęściej formułowane osobno dla przepływu laminarnego, przejściowego i burzliwego. O charakterze przepływu decyduje wartość liczby Reynoldsa

$$\text{Re} = \frac{w_{sr} d_h}{\nu} \quad (1)$$

gdzie:  $w_{sr}$  jest średnią (dla przekroju poprzecznego kanału) prędkością płynu [m/s],  $d_h$  średnicą hydrauliczną kanału [m],  $\nu$  współczynnikiem lepkości kinematycznej [m<sup>2</sup>/s].

Średnica hydrauliczna jest definiowana następująco

$$d_h = \frac{4A}{\Omega} \quad (2)$$

gdzie:  $A$  jest polem przekroju poprzecznego kanału [m<sup>2</sup>],  $\Omega$  jest obwodem zwilżonym kanału [m].

Dla przekroju kołowego jest

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

$$\Omega = \pi d \quad (4)$$

Po podstawieniu równań (3) i (4) do równania (2) dostajemy dla przekroju kołowego

$$d_h = \frac{4 \frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = d \quad (5)$$

Średnią (dla przekroju poprzecznego kanału) prędkość płynu definiuje równanie

$$w_{sr} = \frac{\int \rho w dA}{\int_A \rho dA} \quad (6)$$

Dla stałej gęstości płynu

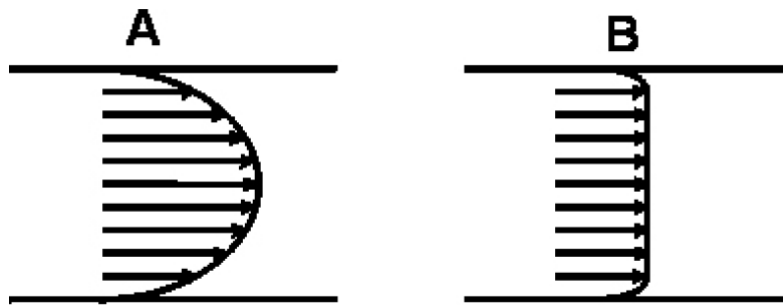
$$w_{sr} = \frac{1}{A} \int_A w dA \quad (7)$$

Dla rur hydraulicznie gładkich o przekroju kołowym przyjmuje się, że:

dla  $Re < 2300$  przepływ jest laminarny

dla  $2300 < Re < 10\ 000$  przepływ ma charakter przejściowy

dla  $Re > 10\ 000$  przepływ jest burzliwy



**Rys. 1.** Profile prędkości w rurze.

**A** przepływ laminarny, **B** - przepływ burzliwy.

Średnią (dla przekroju poprzecznego kanału) temperaturę płynu w kanale określa się ze wzoru

$$T_{sr} = \frac{\int_A \rho c_p w T dA}{\int_A \rho c_p w dA} \quad (8)$$

Gdybyśmy warstwę płynu o długości  $dx$  (gdzie  $x$  jest kierunkiem przepływu) dokładnie wymieszali uzyskując wyrównanie w przekroju poprzecznym temperatury, gęstości i prędkości, to temperatura płynu byłaby równa  $T_{sr}$ .

Dla stałej gęstości i stałego ciepła właściwego płynu jest

$$T_{sr} = \frac{1}{Aw_{sr}} \int_A w T dA \quad (9)$$

W dalszej części wykładu średnią wartość prędkości będziemy oznaczać po prostu jako  $w$ , natomiast średnią wartość temperatury w kanale jako  $T_f$ .

Przepływ w kanale, który jest elementem wymiennika ciepła, jest nieizotermiczny. Właściwości termofizyczne płynu, takie jak: współczynnik lepkości, przewodność cieplna, gęstość, ciepło właściwe, oblicza się dla średniej temperatury dla całego kanału. Na przykład, średnią temperaturę płynu wyznacza się jako średnią arytmetyczną ze średnich (dla przekroju poprzecznego) temperatur na wlocie do kanału,  $T_f'$ , oraz na wylocie z kanału,  $T_f''$

$$T_f = \frac{T_f' + T_f''}{2} \quad (10)$$

W uogólnionych korelacjach mogą występować liczby podobieństwa i bezwymiarowe współczynniki wymagające użycia właściwości termofizycznych wyznaczonych dla średniej temperatury ścianki,  $T_w$ , lub średniej temperatury warstwy przyściennej,  $T_m$ , której przybliżoną wartość można obliczyć ze wzoru

$$T_m = \frac{T_w + T_f}{2} \quad (11)$$

Współczynniki zależne od właściwości płynu dla dwóch różnych temperatur to na przykład:

- iloraz współczynników lepkości dynamicznej  $\frac{\mu_f}{\mu_w}$ ,

- iloraz liczb Prandtla  $\frac{Pr_f}{Pr_w}$ .

W uogólnionych korelacjach występują też ilorazy charakterystycznych wymiarów kanału, np.  $\frac{L}{d}$  lub  $\frac{d}{L}$ .

Każda korelacja ma określony zakres stosowalności. Korelacja może być ograniczona ze względu na: rodzaj płynu, kształt przekroju poprzecznego kanału, położenie kanału (poziome, pionowe), zakresy liczb podobieństwa ( $Re$ ,  $Pr$ ,  $Pe = Re \cdot Pr$ ), zakresy ilorazów  $\mu_f / \mu_w$  oraz  $L/d$ , itp.

Są korelacje bardzo ogólne, np. ważne dla dowolnych płynów i dowolnych kanałów, lecz są także takie, które można stosować tylko do określonego płynu (np. dla wody) i do określonego kanału (np. do kanału o kołowym przekroju poprzecznym).