

Janusz DZIAK¹, Kamila RATAJCZAK²

e-mail: janusz.dziak@pwr.wroc.pl

¹ Zakład Inżynierii Chemicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Wroclawska, Wrocław² Whirlpool Polska S.A., Wrocław

Zastosowanie pierścieni Bialeckiego jako turbulizatorów zwiększających sprawność wymiennika ciepła

Wstęp

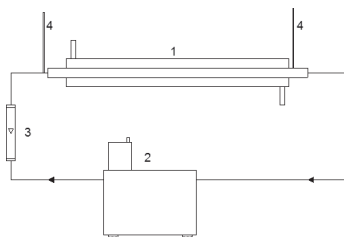
Zastosowanie turbulizatorów statycznych dla procesów mieszania i wymiany ciepła znajduje liczne zastosowania, czy to do emulgowania cieczy nie mieszających się, czy też dla poprawy sprawności cieplnej, istniejących wymienników ciepła. Stosunkowo niewielkim kosztem inwestycyjnym można szybko zwiększyć sprawność cieplną wymiennika. W literaturze można znaleźć szereg prac dotyczących poprawy warunków wymiany ciepła z wykorzystaniem turbulizatorów różnej konstrukcji [Charun, 2008; Smith i Pongjet, 2010; Mikielewicz i in., 2012]. Ponieważ oprócz charakterystyki cieplnej pracy wymienników ważna jest również hydraulika tych aparatów, a w szczególności opory przepływu, dlatego autorzy badań z zastosowaniem turbulizatorów przedstawiają zazwyczaj również wyniki pomiarów spadków ciśnienia w wymiennikach ciepła. W praktyce projektowej wartości współczynników przenikania ciepła oblicza się korzystając z korelacji opisujących wyniki badań doświadczalnych ruchu ciepła. Dostępne równania uzyskano bez stosowania turbulizatorów, dlatego też porównanie wyników obliczeń z wartościami współczynników uzyskanych doświadczalnie z zastosowaniem turbulizatorów pozwala określić skalę poprawy sprawności cieplnej wymiennika ciepła.

Pierścienie Bialeckiego znane są jako sprawne wypełnienie kolumn stosowanych do procesów wymiany masy. W Politechnice Wrocławskiej wykonano badania wykorzystania pierścieni Bialeckiego jako turbulizatorów dla rur z przepływem gazu [Cebasek, 1978].

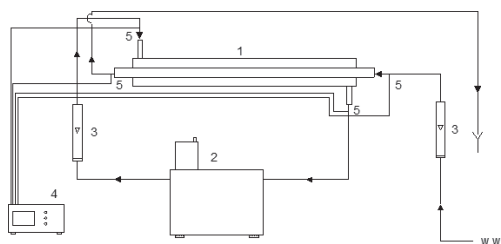
Celem niniejszej pracy jest określenie warunków wymiany ciepła oraz spadków ciśnienia w wymienniku ciepła wykorzystującym pierścienie Bialeckiego jako turbulizatory przepływającej cieczy.

Opis instalacji doświadczalnej

Schematy instalacji stosowanych w badaniach spadku ciśnienia oraz do określania warunków wymiany ciepła przedstawiono odpowiednio na rys. 1 i 2.



Rys. 1. Schemat instalacji stosowanej w badaniach spadku ciśnienia. 1 – wymiennik ciepła typu rura w rurze, 2 – termostaat, 3 – rotometr, 4 – szklane rurki piezometryczne



Rys. 2. Schemat aparatury do określania warunków wymiany ciepła w wymienniku ciepła typu rura w rurze. 1 – wymiennik ciepła typu rura w rurze, 2 – termostaat, 3 – rotometr, 4 – miernik temperatury, 5 – termopary, ww – obieg wody zimnej



Rys. 3. Pierścienie Bialeckiego stosowane w badaniach

W badaniach stosowano wymiennik ciepła typu rura w rurze zbudowany z dwóch mosiężnych rur o wymiarach rury zewnętrznej: średnica $d_{zew1} = 0,032$, grubość ścianki $s_1 = 0,002$ m oraz rury wewnętrznej: średnica $d_{zew2} = 0,016$ m, grubość ścianki $s_2 = 0,0025$ m. Wymiennik podczas badań był zamocowany w pozycji poziomej i miał długość 0,585 m.

Wykonano serie pomiarów z pustą rurą wewnętrzną wymiennika ciepła oraz z rurą wypełnioną pierścieniami Bialeckiego. W rurze wewnętrznej wymiennika płynęła woda zimna. W przestrzeni międzyrurowej płynęła woda gorąca. Ciecze w wymienniku przepływały w przeciwnym kierunku.

Na rys. 3 zamieszczono zdjęcia pierścieni Bialeckiego stosowanych w badaniach. Wymiary pierścienia: średnica $d_p = 0,0105$ m, wysokość $h_p = 0,012$ m.

Metodyka badań

Badania wykonano z użyciem wody w dwóch seriach pomiarowych. Pierwsza seria miała na celu określenie spadków ciśnienia dla wymiennika bez wypełnienia, a następnie z wypełnieniem pierścieniami Bialeckiego. Pierścienie w rurze wymiennika umieszczono jeden za drugim w taki sposób, że każdy pierścień (oprócz skrajnych) stykał się z poprzedzającym i następującym po nim. Drugą serią stanowiły pomiary, w których określano warunki wymiany ciepła. Tak samo jak w pierwszej serii badania przeprowadzono dla rury bez wypełnienia, jak i wypełnionej pierścieniami Bialeckiego.

Określanie spadków ciśnienia

Pomiary spadków ciśnienia cieczy w zależności od natężenia przepływu cieczy przepływającej w rurze wewnętrznej wymiennika ciepła typu rura w rurze wykonano w instalacji przedstawionej schematycznie na rys. 1.

Spadek ciśnienia mierzono wykorzystując wskazania rurek piezometrycznych. Woda przepływająca przez rurę wewnętrzną wymiennika ciepła była termostatawana, a jej natężenie przepływu mierzono przy użyciu rotometru.

Pomiary wykonano dla temperatury wody w zakresie $20 \div 60^\circ\text{C}$.

Określanie warunków wymiany ciepła

Pomiary warunków wymiany ciepła wykonano w instalacji przedstawionej schematycznie na rys. 2. Gorąca woda z termostatu, o stałym natężeniu przepływu, kierowana była do przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła. Woda zimna, której natężenie przepływu zmieniano w trakcie badań, zasilala rurę wewnętrzną wymiennika ciepła. Natężenia przepływu cieczy były mierzone za pomocą rotometrów, które wcześniej przecechowano. Temperatury cieczy na wlocie i wylocie wymiennika ciepła mierzono mikroprocesorowym, wielokanałowym rejestratorem elektronicznym typu MPI-L METRONIC, z użyciem termopary typu K.

Korelacje obliczeniowe

Wartości doświadczalne współczynnika przenikania ciepła wyznaczano z równania *Pecleta* (w badanym wymienniku ciepła nie było możliwości pomiaru temperatury ścianki, dlatego nie wyznaczano współczynnika wnikania ciepła):

$$\dot{Q} = kA_m \Delta T_m \quad (1)$$

gdzie:

- \dot{Q} – ilość wymienionego ciepła [W],
- k – współczynnik przenikania ciepła [W/(m²K)],
- $A_{m,av}$ – średnia logarytmiczna powierzchnia wymiany ciepła [m²],
- ΔT_m – średnia logarytmiczna różnica temperatur [K]

Dla warunków procesowych każdego pomiaru obliczono wartość współczynnika przenikania ciepła. Wartość tą ustalono, znając grubość ścianki wymiennika, materiał z jakiego został on wykonany, oraz wykorzystując wartości współczynników wnikania ciepła po obu stronach ścianki wymiennika, obliczonych z dostępnych w literaturze korelacji [Kmieć, 2005]. W zależności od rodzaju przepływu cieczy w poszczególnych częściach wymiennika ciepła stosowano różne korelacje zestawione w tab. 1. Dla każdego pomiaru obliczano bilans ciepła, ustalając ilość ciepła oddaną przez ciecz gorącą i pobraną przez ciecz zimną. Zgodność bilansu ciepła (przy błędzie wynoszącym do kilku procent) potwierdzała poprawność wykonania pomiarów.

Tab. 1. Zestawienie korelacji służących do obliczeń współczynników wnikania ciepła [Kmieć, 2005]

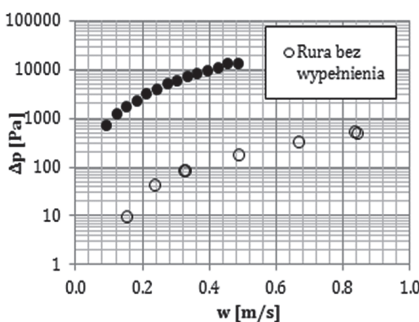
Autor/rodzaj przepływu	Równanie
Ramm/ przepływ przejściowy	$Nu = 0,023Re^{0,8} Pr^{0,4} (1 - 6 \cdot 10^5 Re^{-1,8})$
Hausen/ przepływ przejściowy	$Nu = 0,116(Re^{\frac{2}{3}} - 125) Pr^{\frac{1}{3}} \left[1 + \left(\frac{d}{L}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\eta_c}{\eta_{sc}}\right)^{0,14} \right]$
Michiejew/ przepływ laminarny	$Nu = 0,015Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{sc}}\right)^{0,25} \epsilon_i$
Alaiew/ przepływ laminarny	$Nu = 0,74Re^{0,2} (PrGr)^{0,1} Pr^{0,2}$

Wyniki badań

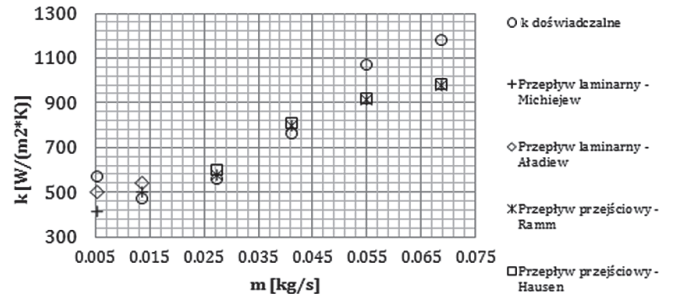
Przykładowe wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rys. 4–6. Na rys. 4 porównano wartości spadków ciśnień uzyskane podczas przepływu cieczy przez pustą rurę oraz rurę wypełnioną pierścieniami *Bialeckiego*.

Na rys. 5 przedstawiono zależność współczynnika przenikania ciepła od masowego natężenia przepływu cieczy w pustej rurze wewnętrznej wymiennika ciepła typu rura w rurze. Kółkami oznaczono wyniki badań doświadczalnych. Korelacje wymienione w opisie rysunku stosowano dla cieczy płynącej w rurze wewnętrznej wymiennika ciepła ($Re = 574\div 6917$). Do obliczeń współczynnika wnikania ciepła po stronie cieczy gorącej (w rurze zewnętrznej) ze względu na osiągnięte wartości liczb $Re = 2717\div 6012$ stosowano korelację *Hausena*, obowiązującą dla przepływu przejściowego.

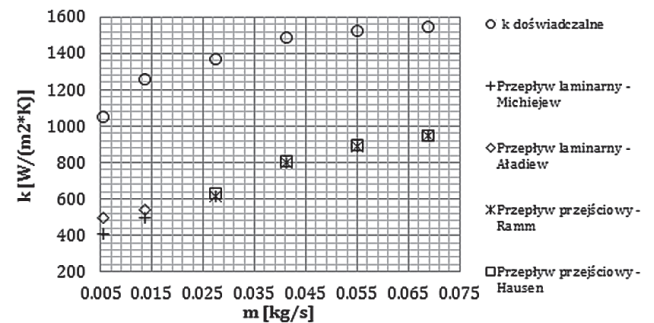
Rys. 6 przedstawia zależność współczynnika przenikania ciepła od masowego natężenia przepływu cieczy w wewnętrznej rurze wymiennika ciepła ($Re = 596\div 6812$). Porównano wyniki badań doświadczalnych



Rys. 4. Porównanie spadków ciśnień w rurze wewnętrznej wymiennika ciepła typu rura w rurze, uzyskanych dla rury bez wypełnienia i wypełnionej pierścieniami *Bialeckiego*. Temperatura cieczy 60°C



Rys. 5. Zależność współczynnika przenikania ciepła k od masowego natężenia przepływu cieczy w rurze wewnętrznej wymiennika ciepła. Porównanie wyników doświadczalnych uzyskanych dla przypadku pustej rury z wartościami obliczonymi z korelacji literaturowych



Rys. 6. Zależność współczynnika przenikania ciepła k od masowego natężenia przepływu cieczy w rurze wewnętrznej wymiennika ciepła. Porównanie wyników doświadczalnych uzyskanych dla przypadku rury wypełnionej pierścieniami *Bialeckiego* z wartościami obliczonymi z korelacji literaturowych

(kółka) dla rury wypełnionej pierścieniami *Bialeckiego* z wynikami obliczeń z użyciem dostępnych korelacji.

Wnioski

Wartości współczynników przenikania ciepła dla wymiennika ciepła typu rura w rurze bez zastosowania wypełnienia pierścieniami *Bialeckiego* obliczone z użyciem korelacji literaturowych są zbliżone do wartości uzyskanych doświadczalnie w zakresie przepływów laminarnych. Dla przepływów przejściowych doświadczalnie uzyskano wyraźnie większe wartości współczynników przenikania ciepła w porównaniu do obliczonych z korelacji literaturowych.

Zastosowanie turbulizatorów w postaci pierścieni *Bialeckiego* w wymienniku ciepła typu rura w rurze powoduje 1,5–2-krotny wzrost wartości współczynników przenikania ciepła w stosunku do rury pustej. Stosunkowo największe różnice uzyskuje się dla przepływów laminarnych.

Zastosowanie turbulizatorów w postaci pierścieni *Bialeckiego* w wymienniku ciepła typu rura w rurze powoduje ok. 100-krotny wzrost spadków ciśnienia przepływającej cieczy na badanym odcinku rury wymiennika ciepła w stosunku do rury pustej.

LITERATURA

Charun H., 2008. Heat transfer and pressure drop in a vertical tube with a nodular turbulizer. *App. Therm. Eng.*, **28**, 1984–1994. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.12.012

Mikielewicz D., Stasiak A., Jewartowski M., Stasiak J., 2012. Measurements of heat transfer enhanced by the use of transverse vortex generators. *App. Therm. Eng.*, **49**, 61–72. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.11.013

Smith E., Pongjet P., 2010. Thermal characterization of turbulent tube flows over diamond-shaped elements in tandem. *Int. J. Therm. Sci.*, **49**, 1051–1062. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.12.003

Cebasek B., 1978. *Pierścienie Bialeckiego jako turbulizatory w wymiennikach ciepła*. Praca doktorska, Inst. Inż. Chem. i Urz. Ciepln., Pol. Wrocławska, Wrocław

Kmieć A., 2005. *Procesy cieplne i aparaty*. Wyd. Pol. Wrocławskiej, Wrocław