

## Streszczenie

Jednym z najważniejszych wyzwań projektantów obecnych czasów jest dążenie do zmniejszenia gabarytów urządzeń, a przy tym zachowanie ich wysokich sprawności. W tym celu niezbędne jest zachowanie prawidłowej wymiany ciepła, zintensyfikowanie procesów transportu masy, energii i pędu. Wyjątku nie stanowią tutaj wymienniki ciepła o przepływie krzyżowo-prądowym z rurami eliptycznymi, w których uzyskanie prawidłowego rozplywu czynnika roboczego w przestrzeni rurowej, przy stosowanych obecnie rozwiązaniach komór: wlotowych i wylotowych (w niektórych konstrukcjach również nawrotnych), jest praktycznie niemożliwe do osiągnięcia. Brak równomiernego napływu cieczy do poszczególnych rurek wymiennika ciepła jest przyczyną niewłaściwej wymiany ciepła w niektórych z nich. Dotyczy to szczególnie rurek o przekroju eliptycznym, często stosowanych z uwagi na ich pozytywne cechy w porównaniu z rurami okrągłymi, m.in. bardziej aerodynamiczny kształt co sprawia, że przepływ czynnika roboczego przez przestrzeń między rurkami jest korzystniejszy. Działają korzystniej nie tylko przy mniejszym spadku ciśnienia, ale także korzystniejsze są rozkłady prędkości, ponieważ strefy przepływu ulegają zmniejszeniu. W efekcie, którym jest wyższy współczynnik wymiany ciepła od gazu do ścianki takiej rury, ze względu na intensywniejszy proces wymiany ciepła. Pozwala to w konsekwencji na zmniejszenie gabarytów urządzenia w stosunku do tego, w którym stosuje się rurki okrągłe.

Wadą tego typu wymienników ciepła jest nierównomierne rozprowadzanie cieczy do poszczególnych jego rur. Przyczyną tego zjawiska jest najprawdopodobniej obecny kształt oraz stosunkowo małe wymiary komór wlotowych i wylotowych. Powyższy fakt powoduje, że prędkości przepływu płynu w rurach takiego wymiennika ciepła mogą się znacznie różnić od siebie, ale w niektórych przypadkach mogą być nawet przeciwne do pożądaných. Skutkuje to niekorzystnymi warunkami eksploatacji, w tym zazwyczaj wysokimi termicznymi naprężeniami ściskającymi, spowodowanymi przegrzewaniem ścian rur.

Analizy warunków pracy omawianych wymienników ciepła wskazują, że w ich eliptycznych rurach przepływy cieczy może występować we wszystkich reżimach, tj. laminarnym, przejściowym i turbulentnym. Świadczą o tym lokalizacje uszkodzeń w tych urządzeniach oraz wyniki symulacji numerycznych warunków cieplno-przepływowych. Szczególnie przepływ przejściowy jest zjawiskiem bardzo złożonym i trudnym do modelowania matematycznego. Jest to stosunkowo słabo poznane, a możliwych korelacji

pozwalających na wyznaczenie współczynnika wnikania ciepła od cieczy przepływającej w przestrzeni rurowej do ścianki rury wymiennika jest kilka. Nie zawsze konkretny model turbulencji:  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , SST lub SST-TR, pozwala na określenie prawidłowych wartości współczynnika przenikania ciepła zwłaszcza dla rury w układzie poziomym. Ich wykorzystanie w obliczeniach numerycznych podczas różnych analiz wymaga oceny i potwierdzenia przydatności (w przypadku omawianych urządzeń np. do wyznaczania parametrów cieczy takich jak prędkość przepływu czy rozkłady temperatury). Opracowane modele matematyczne wymagają, zatem weryfikacji eksperymentalnej, zwłaszcza dla przepływu przejściowego.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono dwa zbudowane stanowiska badawcze w Katedrze Energetyki Politechniki Krakowskiej, a dane pomiarowe wykorzystano do oceny wyników uzyskanych z obliczeń numerycznych, zwłaszcza w zakresie przepływu przejściowego.

Pierwsze ze stanowisk służy do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła od ścianki do czynnika przepływającego (wody) wewnątrz rury eliptycznej. Jego podstawę stanowi rura eliptyczna, a pozostałe elementy stanowią: zbiorniki wody, pompa zasilająca, chłodnica, kształtki i armatura łączeniowa, układ zasilania i regulacji systemu grzewczego oraz aparatura kontrolno-pomiarowa.

Dane pomiarowe uzyskane na stanowisku do wyznaczania współczynnika wnikania ciepła porównano z symulacjami CFD, przy zastosowaniu modelu SST-TR wskazując, że błąd względny średniej temperatury wody na wylocie z odcinka ogrzewanego nie przekracza 4,4%. W przypadku średniej temperatury ścianki rury eliptycznej w pobliżu jej wewnętrznej powierzchni (strefy wylotowej) błąd jest mniejszy i wynosi około 1%. Jednak błąd względny wyznaczonej numerycznie średniej wartości współczynnika wnikania ciepła jest wyższy i sięga około 11%.

Wyniki pomiarów eksperymentalnych są zgodne z symulacjami CFD, można zatem stwierdzić, że zaproponowana metodyka wyznaczania współczynnika jest prawidłowa w pełnym zakresie przepływów: laminarnym, przejściowym czy turbulentnym. Natomiast dobrze znane w literaturze korelacje współczynnika wnikania ciepła wyznaczone przez Gnielińskiego czy Dittus-Boelter prawidłowo przewidują przepływy w zakresie laminarnym. W przypadku przepływu przejściowego i turbulentnego różnice, są wysokie i nie zaleca się stosowania tych korelacji podczas modelowania wymienionych przepływów.

Drugie ze stanowisk badawczych, którego głównym elementem jest wymiennik ciepła, usytuowany jest pionowo i złożony jest z 20 eliptycznych rurek, zabudowanych naprzemiennie w dwa rzędy.

Uzyskane wyniki pomiarów potwierdzają fakt, że rozptyw czynnika roboczego do przestrzeni rurowej krzyżowo-prądowego wymiennika ciepła, charakteryzuje nierównomierność. Przedstawione w pracy wyniki pomiarów wskazują, że największe różnice przepływu dotyczą rurek usytuowanych pod króćcem wlotowym.

Wyniki symulacji CFD potwierdzają zgodność z uzyskanymi wynikami pomiarów eksperymentalnych. Niewielkie rozbieżności obserwowane są w rejonie za króćcem wlotowym, gdzie symulacja CFD przewiduje nieco wyższą wartość natężenia przepływu, podczas gdy niższe natężenia przepływu są obliczane w rurkach sąsiednich. Dlatego dla rury eliptycznej przy przepływie wewnętrznym o liczbie  $Re$  od 1800-3100, model turbulencji SSG Reynolds Stress Transport zapewnia zadowalającą zgodność z danymi pomiarowymi.

Zaprojektowane konstrukcje kolektorów wymiennika ciepła pozwoliły na zmniejszenie nierównomierności przepływu w przestrzeni rurowej wymiennika ciepła z rurami eliptycznymi do poziomu: 56% - przepływ laminarny, 8% - przepływ przejściowy, 14% - przepływ turbulentny.

18.08.2022 Stelma

