

Grzegorz Ligus

e-mail: g.ligus@po.opole.pl

Katedra Inżynierii Środowiska, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

Badania nierównomierności przepływu cieczy wzdłuż pęku rur wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi

Wstęp

Płaszczowo-rurowe wymienniki ciepła należą do powszechniej spotykanych typów aparatów do wymiany ciepła w przemyśle. Celem zwiększenia ich efektywności stosuje się modyfikacje konstrukcyjne w postaci przegród, które mają za zadanie doprowadzić do wzrostu burzliwości przepływu w przestrzeni międzyrurowej, a w konsekwencji do zwiększenia współczynnika wymiany ciepła.

Wyróżnia się kilka typów przegród (m.in. segmentowe, rusztowe, dyskowe, helikoidalne), które różnią się charakterystyką hydrodynamiczną, uwarunkowaniami praktycznymi czy kosztami produkcji.

Przegrody segmentowe zapewniają duży współczynnik wymiany ciepła [TEMA, 2007], jednak powodują wysokie spadki ciśnienia generowane przez zaburzony przepływ w przestrzeni międzyrurowej, co bezpośrednio wpływa na podwyższenie kosztów eksploatacyjnych. Z tego powodu bardzo istotna jest wiedza na temat charakteru przepływu czynnika w przestrzeni międzyrurowej, która daje podstawę do optymalnego rozmieszczenia przegród w aparacie i gwarantuje kompromis między podwyższonym spadkiem ciśnienia a oczekiwanym wysokim współczynnikiem wymiany ciepła.

Cyfrowa anemometria obrazowa DPIV może być jedną z metod oceny konstrukcji aparatu. Umożliwia analizę rzeczywistego przemieszczania się elementarnych porcji czynnika w przestrzeni międzyrurowej, a tym samym identyfikację obszarów stagnacji oraz lokalnych turbulencji przepływu.

W prezentowanych badaniach zastosowano cyfrową anemometrię obrazową do nieinwazyjnej analizy rozprzuty strug wewnątrz przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła

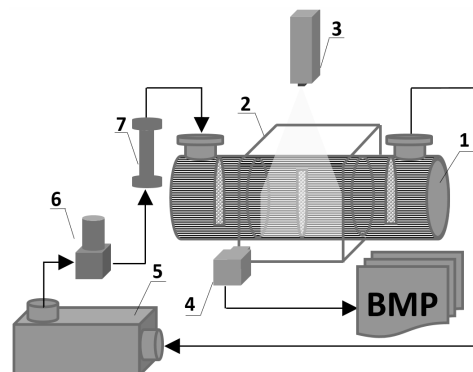
Badania doświadczalne

Stanowisko badawcze

Wykorzystanie metody DPIV narzuciło konieczność wykonania modelowego wymiennika ciepła z zachowaniem maksymalnej transparentności płaszcza i pęku rur oraz minimalizacja aberracji układu optycznego w postaci dystorsji beczkowych (zniekształceń krzywoliniowych prostych odcinków obrazowanego obszaru pomiarowego) generowanych przez walcową powierzchnię płaszcza wymiennika ciepła. Osiągnięcie tych cech uzyskano poprzez wykonanie modelu wymiennika ciepła z polimetakrylanu metylenu (PMMA) oraz zastosowanie płasko powierzchniowej przystawki optycznej zamocowanej na zewnątrz płaszcza wymiennika ciepła i wypełnionej tą samą cieczą, która przepływa wewnątrz przestrzeni międzyrurowej wymiennika. Podobne rozwiązanie zostało zastosowane w pracy *Changa i in.* [2015]

Model wymiennika ciepła stanowił główny element stanowiska badawczego (Rys. 1). Zbudowany był z płaszcza o średnicy wewnętrznej 240 mm i długości 2000 mm oraz pęku 37 rur średnicy 20 mm. Do badań wytypowano przestawny układ rur, gdyż umożliwia on upakowanie większej liczby rur w pęku, przez co jest o około 25% wydajniejszy niż układ szeregowy i z tego względu częściej spotykany w praktyce przemysłowej [Saunders, 1983; TEMA, 2007]. Na pęku rur zamontowanych zostało 5 przegród segmentowych charakteryzujących się strzałą wycięcia 25%.

Obieg czynnika (woda) przepływającego przez wymiennik zapewniała pompa wielostopniowa sterowana sygnałem z przepływomierza elektromagnetycznego.

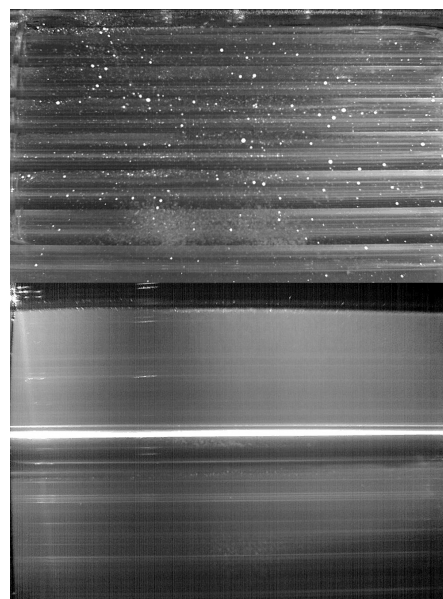


Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego: 1 – model płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi, 2 – przystawka optyczna niwelująca dystorsje beczkowe, 3 – laser, 4 – szybka kamera wideo, 5 – zbiornik, 6 – pompa, 7 – przepływomierz

Metodyka

Tor optyczny tworzyła szybka kamera wideo usytuowana w sposób umożliwiający prostopadłe obserwowanie obszaru przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła. Obserwowany obszar przestrzeni międzyrurowej oświetlony był za pomocą światła laserowego (technika noża optycznego) generującego koherentną wiązkę światła umożliwiającego selektywny wybór obrazowanej płaszczyzny przepływu (Rys. 2).

Podobny tor optyczny wykorzystywany był w pracach [Bin i in., 2000; Iwaki i in., 2004; Paul i in., 2007; Velasco i in., 2008; Chang i in., 2015].



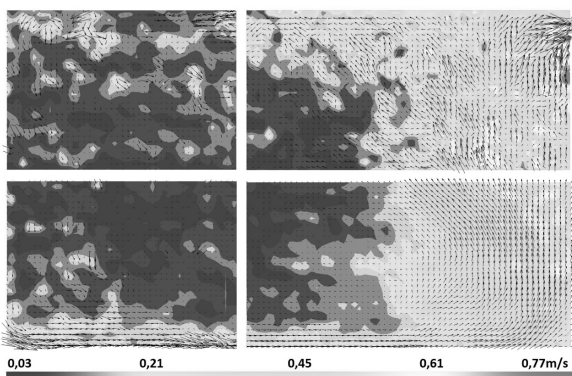
Rys. 2. Różne sposoby oświetlenia przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła: (u góry) światło niekoherentne (oświetlenie halogenowe) - widok głębi przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła pomiędzy dwiema przegrodami; (na dole) światło koherentne (technika noża optycznego) - widok pojedynczej płaszczyzny prostopadłej do skrajnej rury 4. rzędu przestrzeni międzyrurowej pomiędzy dwiema przegrodami.

Jako cząstek znacznikowych do metody DPIV użyto mikrogranulatu polietylenowego o średniej średnicy 180 μm powlekanego powłoką metlizującą zwiększającą refleksyjność. Rodzaj i ilość cząstek znacznikowych dobrano na podstawie wykonanych własnych badań testowych różnych znaczników dedykowanych do metody DPIV [Adrian i Westerweel, 2011].

Dla uzyskania większej dokładności metody pomiarowej podzielono obszar przestrzeni międzyrurowej pomiędzy przegrodami na cztery ćwiartki. W każdej z nich dokonywano obrazowania w rozdzielczości 1024 x 512 pikseli w efekcie czego uzyskano wyraźniejsze odzwierciedlenie ruchu znaczników niż w przypadku pojedynczego obrazowania w maksymalnej dostępnej rozdzielczości (1024 x 1024 pikseli). Zestawienie pełnego obszaru analizy następowało z połączenia obrazów zarejestrowanych w poszczególnych ćwiartkach z uwzględnieniem pokryć wzdłużnych (21%) i poprzecznych (8%). Dodatkowo przed analizą DPIV wprowadzono maskę krzyżową na granice łączonych obrazów. Rejestracji zjawisk przepływowych dokonywano z częstotliwością 924 Hz. Każda seria pomiarowa liczyła 200 obrazów. Analizę DPIV przeprowadzono dla każdej pary następujących po sobie dwóch obrazów z wykorzystaniem oprogramowania *Dantec Dynamics Dynamic Studio 4.10*. Rezultat końcowy analizy DPIV w postaci wektorowego pola prędkości generowano po analizie statystycznej wszystkich jednostkowych wektorowych pól prędkości uzyskanych z każdej serii pomiarowej.

Wyniki i ich analiza

Na rys. 3 przedstawiono przykładową wizualizację wektorowego pola prędkości cieczy w przestrzeni międzyrurowej pomiędzy trzecią a czwartą przegrodą w centralnej płaszczyźnie wymiennika. Uzyskane rezultaty odzwierciedlają zjawiska przepływowe dla strumienia czynnika wynoszącego 6 m^3/h .



Rys. 3. Przykładowe wektorowe pole prędkości w przestrzeni międzyrurowej wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi: nasada przegrody (róg lewy górny oraz prawy dolny); okno przegrody (róg lewy dolny oraz prawy górny)

Na podstawie wykonanych analiz obszar pomiędzy przegrodami podzielono na wyraźne dwie strefy: wysokiej i niskiej prędkości przepływu. Taka nierównomierność sprzyja wzrostom miejscowych oporów przepływu [Jozaei i in., 2012], ponadto nie wpływa również pozytywnie na oczekiwany wzrost współczynnika wymiany ciepła, wynikający z obecności przegród segmentowych. W przedstawionym przypadku jedynie 22% długości pęku rur pomiędzy przegrodami leżało w obszarze podwyższonej prędkości przepływu. Negatywnym aspektem będącym konsekwencją nierównomierności przepływu było wytworzenie się w centralnym obszarze przestrzeni pomiędzy przegrodami charakterystycznego wiru stagnacyjnego. Stanowił on istotną barierę w cyrkulacji czynnika wzdłuż przestrzeni międzyrurowej. Należy więc dążyć do minimalizacji występowania wirów stagnacyjnych w obszarach pomiędzy przegrodami poprzez zmiany parametrów konstrukcyjnych lub przepływowych wymiennika ciepła. Podobne analizy przedstawiono w pracy [Chang i in., 2015].

Badania wizualizacyjne wzdłuż pęku rur umożliwiły również identyfikację strug cieczy przepływających przez szczeliny pomiędzy krawędziami przegród a płaszczem oraz pomiędzy rurami a przegrodami. Na rys. 3 zaobserwować można, iż w obszarach zmiany kierunku przepływu u nasady przegrody nie następował gwałtowny spadek prędkości. Relatywnie wysoka wartość lokalnej prędkości przepływu cieczy umożliwiała w większym zakresie pokonywanie miejscowych oporów przepływu w szczelinach. Istotnym był tutaj również dominujący przed przegrodą kierunek przepływu (prostopadły do płaszczyzny przegrody). W efekcie czynniki te prowadziły do wzrostu udziału przepływu strug szczelinowych u nasad przegród. Dlatego też sugeruje się, aby zabiegi ograniczające udział strug szczelinowych w przestrzeni międzyrurowej koncentrować w obszarach nasad przegród.

Wnioski

Przeprowadzone badania nierównomierności przepływu cieczy wzdłuż pęku rur wymiennika ciepła z przegrodami segmentowymi potwierdziły wysoką skuteczność cyfrowej anemometrii obrazowej (DPIV) w diagnostyce aparatów tego typu.

Oparta na analizie wektorowej metoda identyfikacji wirów stagnacyjnych tworzących barierę dla pełnej cyrkulacji cieczy wzdłuż pęku rur wymiennika ciepła może być skutecznym narzędziem oceny efektywności pracy tego urządzenia.

Wyniki przedstawionych badań pozwoliły również wskazać obszary o dużym potencjale udoskonalenia konstrukcyjnych w zakresie minimalizacji przepływów szczelinowych pomiędzy przegrodami a płaszczem wymiennika oraz pomiędzy przegrodami a rurami.

Oba omawiane w pracy zagadnienia problemowe powinny zostać potwierdzone w szerszym programie badań, który odpowiednio ukierunkowany może zaowocować opracowaniem nowego algorytmu optymalizacyjnego dla wymienników ciepła lub weryfikacją istniejących metod obliczeniowych w zakresie doboru przegród oraz geometrii pęku rur.

LITERATURA

- Adrian R.J., Westerweel J., (2011). Particle image velocimetry, Cambridge University Press, New York
- Bin Ch., Liejin G., (2000). Particle image velocimetry measurement of flow across tube bundle in waste heat boiler. *J. Therm. Sci.*, 9(3), 249-256. DOI: 10.1007/s11630-000-0059-1
- Chang T.H., Lee Ch., Lee H., Lee K.S., (2015). Velocity profiles between two baffles in a shell and tube heat exchanger. *J. Therm. Sci.*, 24(4), 356-363. DOI: 10.1007/s11630-015-0795-x
- Dominguez-Ontiveros E.E., Hassan Y.A., (2009). Non-intrusive experimental investigation of flow behavior inside a 5x5 rod bundle with spacer grids using PIV and MIR. *Nuclear Eng. Design*, 239, 888-898. DOI:10.1016/j.nucengdes.2009.01.009
- Iwakı C., Cheong K.H., Monji H., Matsui G., (2004). PIV measurement of the vertical cross-flow structure over tube bundles. *Exp. Fluids*, 37, 350-363. DOI: 10.1007/s00348-004-0823-1
- Jozaei A.F., Baheri A., Hafshejani M.K., Arad A., (2012). Optimization of baffle spacing on heat transfer, pressure drop and estimated price in a shell-and-tube heat exchanger. *World App. Sci. J.*, 18(12), 1727-1736. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2012.18.12.2484
- Paul S.S., Tachie M.F., Ormiston S.J., (2007). Experimental study of turbulent cross-flow in a staggered tube bundle using particle image velocimetry. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 28, 441-453. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.01.009
- Saunders E.A.D., (1983). *Features relating to thermal design* [in:] Schlunder E.U. (Ed.). Heat Exchanger Design Handbook, Section 4.2.5, Hemisphere, Washington
- TEMA, (2007). *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturer Association*, New York
- Velasco F.J.S., del Prá L.C., Herranz L.E., (2008). Expansion of a radial jet from a guillotine tube breach in a shell-and-tube heat exchanger. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 32, 947-961, DOI: 10.1016/j.expthermfluidsci.2007.10.012