

ANALIZA NUMERYCZNA PRACY WYMIENNIKA CIEPŁA Z AWARYJNĄ NIESZCZELNOŚCIĄ

NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT EXCHANGER WITH EMERGENCY LEAK

Wojciech Pospolita

Maciej Cholewiński

Politechnika Wrocławska

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Wybrzeże Wyspiańskiego 27

50-370 Wrocław

e-mail: wojciech.pospolita@pwr.edu.pl

e-mail: maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

Abstract: Heat exchangers belong to the group of devices, whose proper operation is essential for the proper conduct of industrial processes. The growing influence of numerical methods in the design stage of exchanger, allows to optimize their design in terms of efficiency and meet the specified thermal parameters. A relatively new way to use numerical simulation is the study of unsteady heat transfer that characterized their work during failure. The article presents results of numerical analysis of the operation of a hypothetical heat exchanger with emergency leak of one of the coils. The effects of stream loss in the pipe and change of flow dynamics of entire system were taken into consideration. The importance of location of leak on the behavior of heat exchanger was also taken into account. The simulation was performed using the commercial software Autodesk Simulation CFD.

Keywords: heat exchangers, emergency leak, numerical calculation.

Wprowadzenie

Wymienniki ciepła należą do urządzeń szeroko rozpowszechnionych w wielu dziedzinach gospodarki. Specyfika poszczególnych procesów przemysłowych doprowadziła do powstania szeregu różnych pod względem konstrukcji i zastosowania typów wymienników. Uproszczony podział podaje [1], który przedstawiono na rys. 1. Do najpowszechniej stosowanego typu wymiennika ciepła należą wymienniki powierzchniowe. Przekazywanie ciepła zachodzi między czynnikami rozdzielonymi powierzchnią rozgraniczającą, która może przybierać dowolny kształt. Dużą zaletą tych urządzeń jest fakt, że przy normalnej pracy zachodzi w nich

ustalone przekazywanie ciepła. Czynniki zachowują też czystość, gdyż na elementy konstrukcyjne wymiennika dobiera się takie materiały, które nie wchodzi w reakcję z przepływającym medium. Kolejnym typem jest wymiennik mieszkankowy, w którym dużą rolę odgrywa przekazywanie mas, zatem płyny stykają się bezpośrednio, a proces wymiany ciepła traktowany jest w wielu przypadkach jako efekt uboczny. Wymienniki z wypełnieniem charakteryzują się obecnością wypełniacza, którym może być ciało stałe lub płyn. Zadaniem wypełniacza jest pośrednictwo w wymiennie ciepła. W przypadku, gdy wypełniacz posiada wewnętrzne źródło ciepła wymiennik nazywamy reaktorem. W innym przypadku jest to regenerator.



Rys. 1. Podział konstrukcji wymienników ciepła [1].

Istotną rolę, jaką spełniają wymienniki ciepła sprawia, że wystąpienie stanu awaryjnego w każdym przypadku generuje wielopostaciowe zagrożenie oraz wysoki koszt związany z koniecznością serwisowania tego urządzenia. Przykładem częstych i poważnych awarii mogą być uszkodzenia przegrzewaczy pary w kotłach energetycznych. Szereg publikacji naukowych [2, 3, 4, 5, 6] podaje przyczyny występowania awarii oraz ich skutki. Do najważniejszych należy wpływ wysokiej temperatury spalin na węzownice przegrzewacza, który powoduje korozję wysokotemperaturową oraz pełzanie materiału. Istotną przyczyną awarii jest również osadzanie się cząstek popiołu na węzownicy, co powoduje spieki oraz uszkodzenia w strukturze stali. Konsekwencją wymienionych zjawisk są pęknięcia rur i niekontrolowany napływ pary do komory spalania kotła. Wymusza to jego awaryjne odstawienie oraz przeprowadzenie prac remontowych, które wiążą się z wysokimi kosztami.

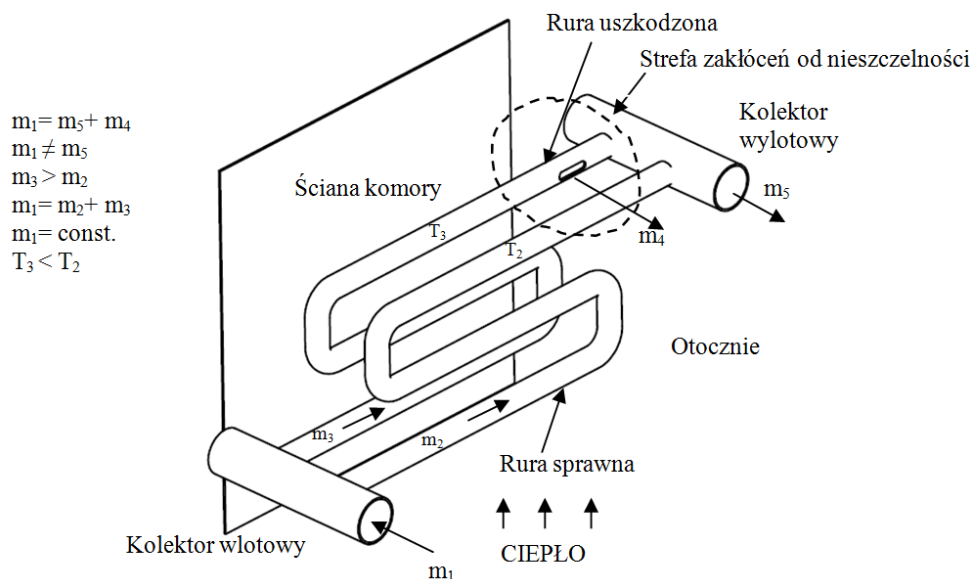
Dążenie do optymalizacji rozwiązań technicznych wymienników skutkuje wzrostem znaczenia stosowania metod numerycznych na etapie projektowania oraz późniejszej analizy pracy działających tych urządzeń. Dzięki zastosowaniu symulacji numerycznych wiele potencjalnych problemów może zostać wyeliminowanych już na etapie projektu, bez konieczności budowy kosztownego prototypu. Przykładem może być praca [7],

w której przeprowadzono symulacje popraw konstrukcji istniejących wymienników typu płaszczowo-rurowego, osiągając zmniejszenie spadku ciśnienia oraz gabarytów tych urządzeń, podnosząc ich sprawność oraz spadek ceny. W [8] prowadzono z powodzeniem optymalizację płytowego wymiennika ciepła zmieniając kąt ustawienia kanałów przepływowych.

W artykule przedstawiono opis procesów termodynamicznych zachodzących w wymienniku ciepła w przypadku wystąpienia awarii urządzenia w postaci pęknięcia jednej z węzownic.

Stan awaryjny układu przepływowego wymiennika

Na rys. 2 przedstawiono uproszczony schemat zachowania układu przepływowego w przypadku wystąpienia awarii. Zgodnie z intuicją inżynierską, spadek ciśnienia w rurze pękniętej na skutek powstania nieszczelności zmniejsza opory przepływu. Powoduje to wzrost strumienia masy m_3 przepływającego przez tę rurę. Jako, że strumień masy m_1 czynnika dopływający do układu jest stały, bilans masy jednoznacznie wskazuje na konieczność spadku strumienia m_2 . Oznacza to gorsze chłodzenie rury sprawnej, dla której temperatura T_2 będzie wyższa niż temperatura T_3 w rurze pękniętej.



Rys. 2. Schemat opisywanego układu przepływowego.

Wpływający przez nieszczelność strumień masy m_4 może przyczynić się do zmiany parametrów otoczenia wokół nieszczelności, dodatkowo komplikując opisywane zagadnienie. W przypadku jego bezpośredniego napływu na sąsiednią węzownicę, mogą powstać bardzo wysokie gradienty temperatur na powierzchni tej rury. Wywołują one naprężenia grożące powstaniem kolejnych pęknięć. Podobna sytuacja będzie mogła mieć miejsce w przypadku czynnika o wysokim ciśnieniu, które to będzie mogło przeciąć sąsiednie węzownice,

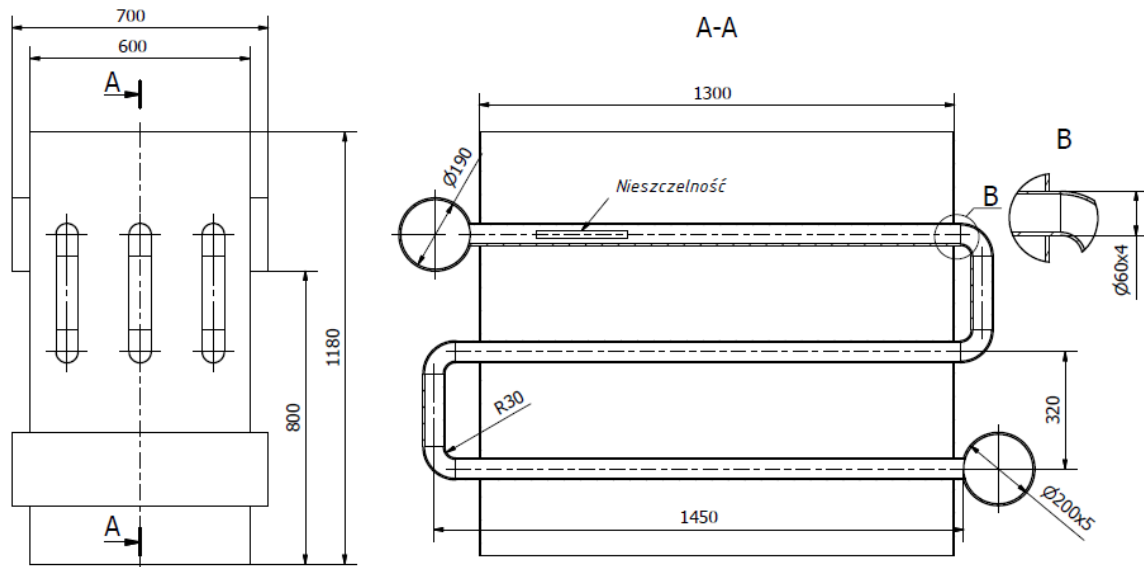
grożąc znacznymi uszkodzeniami układu przepływowego. Duże znaczenie będzie miało zatem miejsce powstania nieszczelności. W przypadku układów wyposażonych w kolektory wlotowe oraz zbiorcze, zagrożeniem jest także zjawisko przepływu wstecznego. Polega ono na zasysaniu z kolektora wylotowego części strumienia masy czynnika, na skutek odpowiednio wysokiego spadku ciśnienia w pękniętej rurze. W konsekwencji, wymiennik może nie utrzymać wystarczającego strumienia czynnika grzewczego,

zagrożając prawidłowemu przebiegowi zależnych procesów przemysłowych. Celem przeprowadzonych obliczeń było zweryfikowanie wymienionych powyżej też na bazie hipotetycznego wymiennika ciepła typu powierzchniowego.

Materiał i metody

Obliczenia przeprowadzono w formie symulacji numerycznej pracy hipotetycznego wymiennika ciepła

powietrze-powietrze. Wymiennik składał się z trzech węzownic wykonanych z miedzi w celu zintensyfikowania procesu wymiany ciepła, kolektorów zbiorczych oraz komory wykonanych z materiału izolacyjnego. Model 3D CAD wymiennika wraz z wymiarami zaprezentowano na rysunku 3. W modelu bryłowym środkowej węzownicy wykonano wycięcie o wymiarach 200x20 mm, którego zadaniem było symulowanie pęknięcia tej rury.



Rys. 3. Model 3D CAD analizowanego wymiennika ciepła.

Symulacja prowadzona była przy użyciu oprogramowania Autodesk Simulation CFD. Zaimplementowany w nim kod numeryczny pozwala na prowadzenie obliczeń według poniższych równań. Równanie ciągłości strugi (zasada zachowania masy) (1), zachowania momentu (2) oraz energii (3):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla \cdot ((\rho V)V) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{T}) + \rho g, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (V(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T + \sum_i h_i J_i + (\bar{T}_{eff} \cdot V) \right], \quad (3)$$

gdzie:

- p - ciśnienie statyczne,
- \bar{T} - tensor naprężeń,
- E - wartość energii,
- $\sum_i h_i J_i$ - człon opisujący dyfuzję,
- $\bar{T}_{eff} \cdot V$ - człon opisujący dyssypację energii.

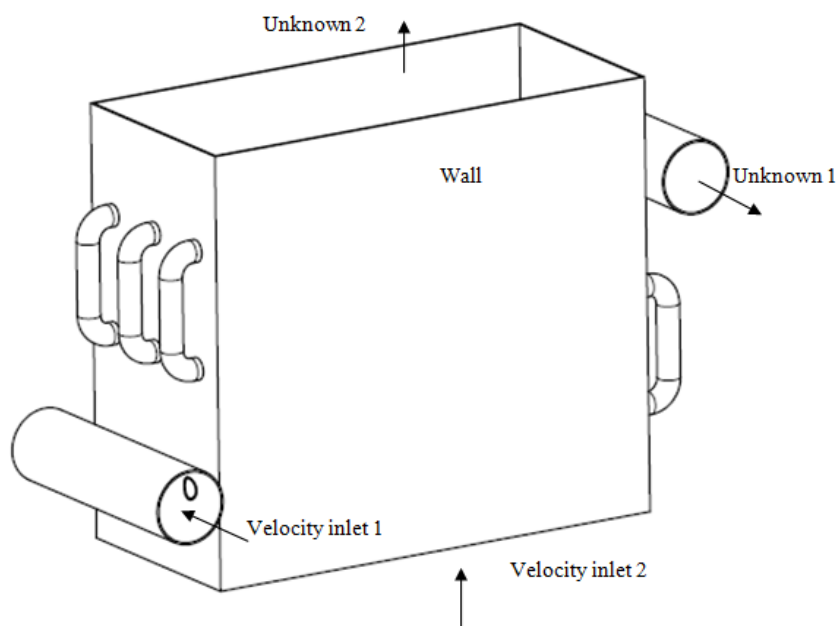
Kluczową kwestią, dla przeprowadzenia symulacji jest zapewnienie odpowiednich warunków matematycznych, które pozwolą na zbieżność otrzymanego rozwiązania. W tabeli 1 przedstawiono parametry ustalone dla przeprowadzonych obliczeń. Takie same parametry zostały wykorzystane przez autorów pracy [8]. W celu uproszczenia obliczeń założono ustaloną pracę wymiennika z awarią, która nie jest jeszcze na tyle poważna by wystąpiła konieczność jego odstawienia. Wprowadzono również siatkę składającą się z 1 200 000 elementów, w umożliwienia szczegółowego wglądu w zmianę gradientu temperatury wokół nieszczelności. Wykorzystanie algorytmu SIMPLE jest zabiegiem z reguły stosowanym w celu obliczeń pola ciśnienia w przypadku zagadnień wymiany ciepła. Algorytm ten jest jedną z metod rozwiązywania równania Navier-Stokes'a. Wykorzystanie standardowego modelu turbulencji k-ε miało na celu przyspieszenie prowadzonych obliczeń. Ponadto, w badanym przypadku, turbulencja nie jest zagadnieniem znacząco wpływającym na rozwiązanie. Zastosowanie dyskretyzacji ilorazem różnicowym pierwszego rzędu również miało na celu skrócenia czasu obliczeń. W analizach wymiany ciepła rzadko używany jest iloraz różnicowy drugiego rzędu. Wykorzystywany jest on częściej przy modelowaniu procesów spalania, które jako bardzo skomplikowane, wymagają bardziej zaawansowanych narzędzi matematycznych.

Tab.1. Wybrane parametry przeprowadzonej symulacji.

Przewodzenie ciepła	Ustalone
Typ siatki	Niestrukuralna, 1.200.000 elementów
Typ solwera	Algorytm SIMPLE
Model turbulencji	k-ε
Dyskretyzacja	Iloraz różnicowy pierwszego rzędu.

Na rys. 4 przedstawiono schemat badanego wymiennika wraz z zaznaczeniem miejsca założenia warunków brzegowych. Zgodnie z regułami prowadzenia symulacji wymiany ciepła w programie Autodesk Simulation CFD

[9], podano dwa strumienie, gorący i chłodny, z określonymi wartościami temperatur. Wartości te oraz opis warunków brzegowych wykorzystanych w trakcie obliczeń zapisano w tabeli 2.



Rys. 4. Schemat analizowanego wymiennika ciepła z zaznaczeniem warunków brzegowych.

Tab.2. Wybrane warunki brzegowe.

Nazwa	Opis	Wartość
Velocity inlet 1	Prędkość strumienia czynnika napływającego w kierunku prostopadłym do płaszczyznę wlotu.	2 m/s
Velocity inlet 2		0,4 m/s
Temperature 1	Wartość temperatury statycznej przepływającego przez powierzchnię czynnika.	10°C
Temperature 2		65°C
Unknown	Warunek określający wylot z układu jako otwarty, nie wprowadzający dodatkowych ograniczeń związanych z wartością ciśnienia.	$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial v}{\partial x} = 0$
Wall	Warunek stanowiący o braku przepływu masy przez daną powierzchnię.	-

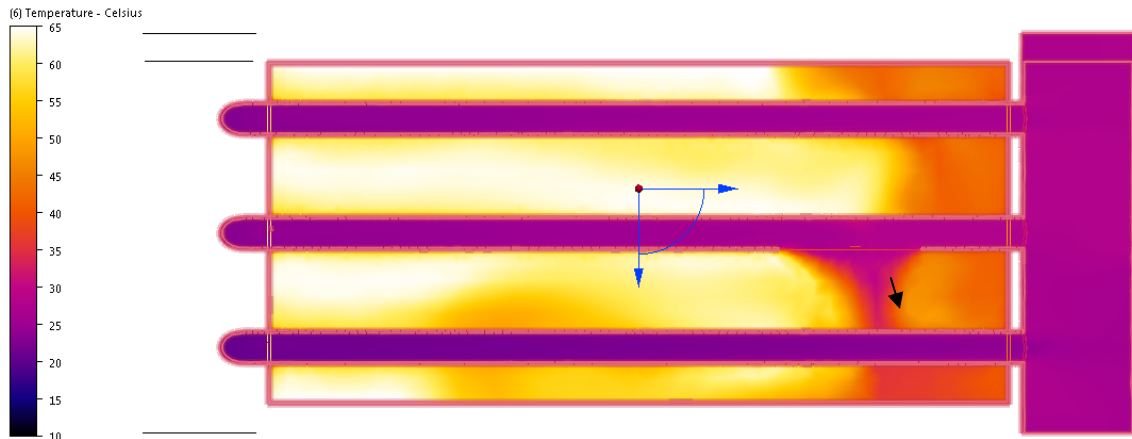
W celu uproszczenia obliczeń założono, że czynnikiem wymieniającym ciepło będzie powietrze. Pominięty został również proces radiacji co oznacza, że całe ciepło przekazywane było na drodze konwekcji. Obliczenia przeprowadzono dla trzech przypadków. W pierwszym, nieszczelność umiejscowiona była przy końcu środkowej węzownicy, w drugim na początku, w trzecim przypadku obliczano pracę wymiennika bez wystąpienia awarii. Symulacja każdorazowo prowadzona była dla takich samych warunków brzegowych.

Wyniki i dyskusja

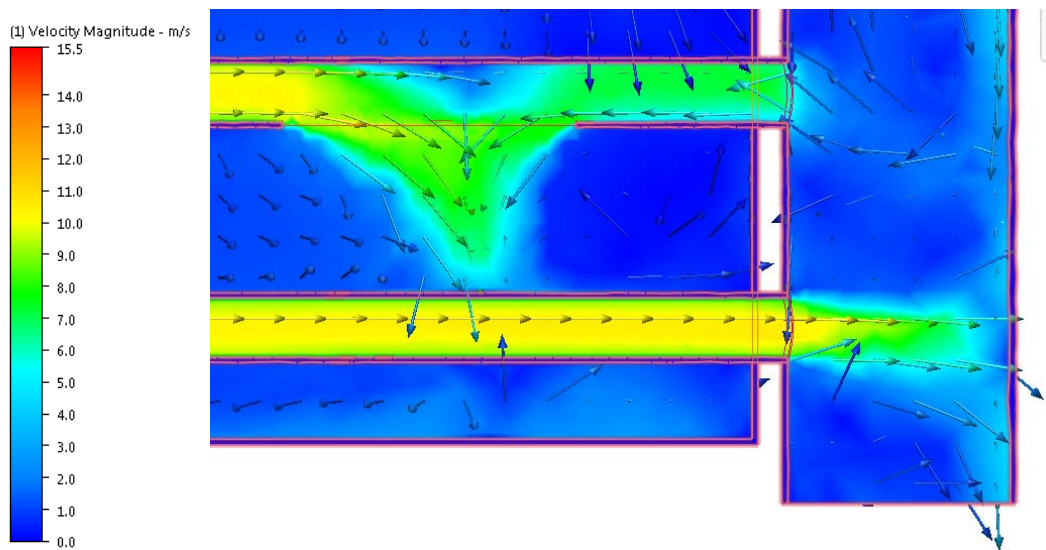
Przeprowadzone obliczenia pozwoliły na otrzymanie danych charakteryzujących przebieg zjawisk termokinetycznych w badanym wymienniku. Na skutek wystąpienia nieszczelności w rurze, czynnik o temperaturze niższej, przedostał się do komory wymiennika. Spowodowało to powstanie znacznych różnic temperatury między poszczególnymi jej obszarami (rys. 5). Można zauważyć również, że wskutek wpływu

czynnika, wokół jednej z węzownic powstało pole niższej temperatury. W konsekwencji czynnik przepływający tą rurą ma mniejszą temperaturę w porównaniu do powietrza w pozostałych węzownicach. Wypływający poprzez nieszczelność strumień, ukierunkowany został bezpośrednio na sąsiednią węzownicę, obniżając temperaturę jej ścianki w miejscu napływu. Może to doprowadzić do powstania naprężeń wynika-

jących z różnicy temperatury. Zgodnie z przewidywaniem, powstanie nieszczelności doprowadziło do przepływu zwrotnego z kolektora zbiorczego, rysunek 6. W konsekwencji, strumień masy przepływający przez nieszczelność wyniósł po uśrednieniu czasowym 102,6 kg/h. Tak duży spadek strumienia masy powietrza zdecydowanie obniża wydajność oraz sprawność wymiennika.



Rys. 5. Wyniki obliczeń w skali temperatury - przypadek 1.



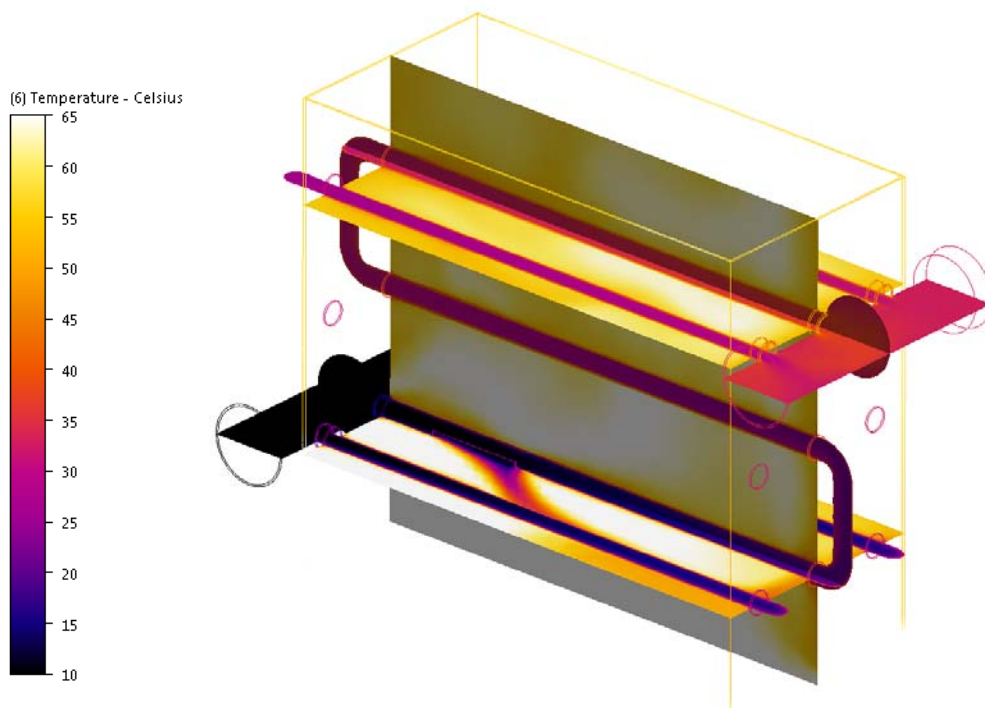
Rys. 6. Wyniki obliczeń w skali prędkości - przypadek 1.

Obliczenia przeprowadzone dla przypadku drugiego, w którym nieszczelność umiejscowiona była na początku węzownicy, wykazały brak przepływu zwrotnego z kolektora wylotowego. Jednakże ubytek masy powietrza już na samym początku węzownicy spowodował znaczną różnicę temperatury między uszkodzoną, a sprawnymi węzownicami – rys. 7. Wynika ona m.in. z różnicy prędkości powietrza w węzownicach – rys. 8. Sytuacja ta grozi znacznym przegrzaniem uszkodzonej rury i w konsekwencji konieczności jej kompleksowej wymiany.

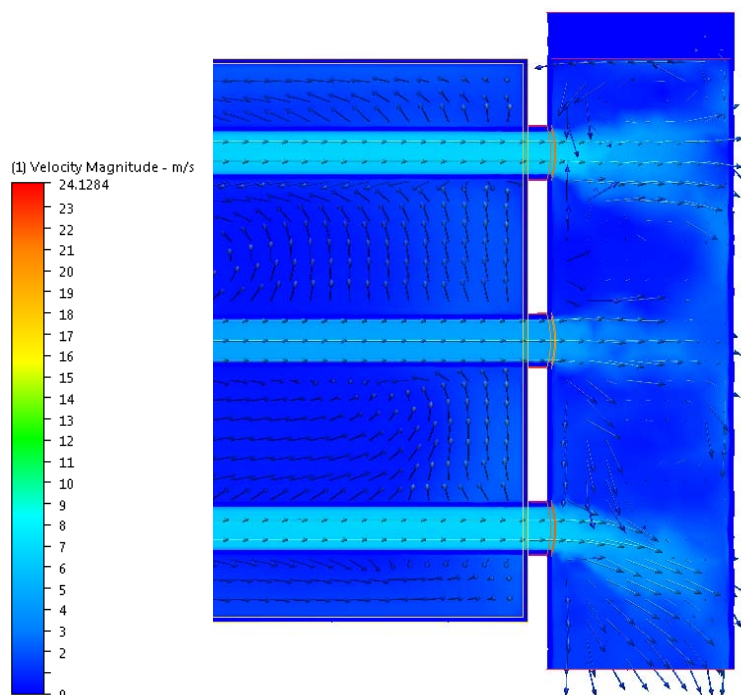
W tabeli 3 zestawiono dane porównawcze dotyczące parametrów czynnika przepływającego przez płaszczyzny wlotowe i wylotowe dla wszystkich analizowanych przypadków pracy wymiennika. Wynika z nich, że najbardziej niekorzystnym zjawiskiem, jest pojawienie się nieszczelności w końcowej części węzownicy. Dla tego przypadku stwierdzono bowiem największy ubytek strumienia masy ogrzewanego powietrza, a także spadek jego temperatury poniżej warunków pracy bez nieszczelności. Ubytek masy rozumiany jest jako różnica między strumieniem powietrza ogrzewanego przy pracy

normalnej, a pracą przy wystąpieniu nieszczelności. Związany jest on z zasysaniem powietrza z kolektora wylotowego. Analizując wartości liczby Reynoldsa można dodatkowo stwierdzić, że dla przypadku 1 uzyskano najmniejszy spadek ciśnienia powietrza ogrzewanego, ale największy grzewczego. Potwierdza to

istnienia fluktuacji temperatury oraz przepływu wewnątrz komory prowadzących do spadku ciśnienia. Dla zaprojektowanej koncepcji wymiennika oraz przyjętych warunków brzegowych, nie udało się zaobserwować znacznej poprawy chłodzenia uszkodzonej węzownicy.



Rys. 7. Wyniki obliczeń w skali temperatury - przypadek 2.



Rys. 8. Wyniki obliczeń w skali prędkości - przypadek 2.

Tab.3. Parametry czynnika przepływającego przez płaszczyzny wlotowe i wylotowe.

Przypadek	Płaszczyzna	Strumień masy powietrza, g/s	Średnia temperatura, °C	LiczbaReynoldsa	Δm , g/s
Nieszczelność na końcu wężownicy	Velocity inlet 1	67,2	10	22059	39,5
	Velocity inlet 2	366,7	65	23136	
	Unknown 1	28,5	26,4	9383	
	Unknown 2	401,6	58,9	25334	
Nieszczelność na początku wężownicy	Velocity inlet 1	67,2	10	22059	27,2
	Velocity inlet 2	366,7	65	23136	
	Unknown 1	40,3	33,9	13230	
	Unknown 2	393	59,1	24793	
Brak nieszczelności	Velocity inlet 1	67,2	10	22059	0
	Velocity inlet 2	366,7	65	23136	
	Unknown 1	68,0	27,1	22279	
	Unknown 2	368,0	61,5	23216	

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad zjawiskami fizycznymi zachodzącymi w wymienniku ciepła na skutek wystąpienia awaryjnej nieszczelności. Generuje ona złożone zjawiska przepływowe, które zależą od wielu zmiennych. Należą do nich strumień masy wypływającego przez nieszczelność czynnika, umiejscowienie nieszczelności oraz geometria samego układu przepływowego. Przekroczenie pewnej krytycznej wartości strumienia masy niekontrolowanego wypływu, spowoduje w konsekwencji negatywne zjawiska. Należy do nich np. przepływ wsteczny w układzie. Wiąże się to ze znacznym ubytkiem masy ogrzewanego czynnika, który to może jednoznacznie niekorzystnie wpłynąć na pracę urządzeń zależnych od poprawnego funkcjonowania wymiennika. Dodatkowo, moment między zmianą kierunku przepływu, w którym przepływ w pękniętej rurze się zatrzymuje, jest niezwykle

niebezpieczny gdyż grozi zniszczeniem układu na skutek ogólnego przegrzania.

Prowadzenie badań nad wymiennikami ciepła z użyciem metod numerycznych wiąże się z wieloma korzyściami. Należą do nich brak konieczności budowy kosztownych prototypów oraz ogólna optymalizacja cieplna konstrukcji. Dodatkowo, pozwolą one na bardziej właściwą interpretację wskazań urządzeń pomiarów zamontowanych przy wymienniku. Z przeprowadzonych obliczeń wynika bowiem, że nieszczelność prowadzi do spadku ciśnienia w układzie. Wielkość ta może być pośrednio mierzona zmniejszeniem poboru mocy przez wentylator lub pompę. Badania numerycznego danego wymiennika pozwolą na określenie korelacji między tymi wielkościami, co może ułatwić pracę służb ruchowych zakładu oraz obniżyć koszty eksploatacji poprzez brak konieczności instalacji skomplikowanej aparatury pomiarowej.

Literatura

- Kalinowski, E., Przekazywanie ciepła i wymienniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1995.
- Taler, J., Taler, D., Ludowski, P., Measurement of local heat flux to membrane water walls of combustion chamber, *Fuel*, 2014, 115, pp. 70-83.
- Mirandola, A., Stoppato, E., Lo Costo, E., Evaluation of the effects of the operation strategy of a steam power plant on the residual life of its devices, *Energy*, 2009, 35, pp. 1024-1032.
- Othman, H., Purbolaksono, J., Ahmad, B., Failure investigation on deformed superheater tubes, *Engineering Failure Analysis*, 2009, 16, pp. 329-339.
- Ahmad, J., Purbolaksano, J., Beng, L.C., Failure analysis on high temperature superheater Inconel 800 tube. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17, pp. 328-333.
- Ahmad, J., Rahman, M.M., Zahariri, M.H.A., Remesh, S., Hassan, J. Purbolaksano, M.A., 2012. High operating steam pressure and localized overheating of a primary superheater tube, *Engineering Failure Analysis*, 2012, 26, pp. 344-348.
- Caputo, C.A., Pelagagge, M.P., Salini, P., Heat Exchange optimized design compared with installed industrial solutions, *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87, pp. 371-380.
- Kan, M., Ipek, O., Gurel, B., Plate heat exchanger as a compact design and optimization of different channel angles, *Acta Physica Polonica A*, 2015, 12, pp. 49-52.
- Autodesk, Autodesk Simulation CFD, User Guide, 2012.