

Marek PRYMON, Michał ROKOSZ,
Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Kraków
Andrzej ZBROWSKI
Instytut Technologii Eksploatacji – Państwowy Instytut Badawczy, Radom

SYMULACJA NUMERYCZNA ROZPŁYWU POWIETRZA W APARACIE DO BADAŃ ZUŻYCIA EROZYJNEGO

Słowa kluczowe

Wymiennik ciepła, erozja, badania wysokotemperaturowe.

Streszczenie

W artykule opisano analizę numeryczną rozplywu gazu oraz obliczenia cieplne, przeprowadzone w celu zaprojektowania aparatu do badań zużycia erozyjnego powierzchni metodą wykorzystującą zasadę dmuchawy Mackensena. Przeprowadzone symulacje CFD (*Computational Fluid Dynamic*) umożliwiają wyznaczenie pola prędkości i ciśnienia w otoczeniu próbki badanego materiału oraz spadek ciśnienia w dyszy aparatu. Badania symulacyjne przeprowadzono dla przepływu w temperaturze otoczenia oraz warunków wysokotemperaturowych.

Wprowadzenie

Spełnienie wymagań dotyczących standardowych warunków pomiaru zużycia erozyjnego, określonych w normie ASTM G 76, w aparatach do badań zużycia erozyjnego wymaga zapewnienia prędkości wypływu gazu z dyszy aparatu na poziomie do 100 m/s. Norma [1] określa również, aby badania były prowadzone w temperaturze 18–28°C. Ze względu na występowanie zjawiska erozji

w urządzeniach pracujących w podwyższonych temperaturach istnieje potrzeba prowadzenia badań uwzględniających szerokie wymagania temperaturowe. Wysokotemperaturowa wersja metody wykorzystującej dmuchawę Mackensena wymaga budowy stanowiska badawczego, w którym powietrze transportujące ścierniwo może osiągać temperaturę nawet kilkuset stopni [2, 3, 4].

Przyjęcie założenia dotyczącego prowadzenia badań zużycia erozyjnego w dowolnej wyższej od otoczenia temperaturze (do 650°C), przy prędkości wypływu gazu z dyszy wynoszącej ok. 100 m/s powoduje konieczność zaprojektowania odpowiedniego wymiennika ciepła ogrzewającego powietrze dostarczane do dyszy dmuchawy.

Przedstawione symulacje numeryczne mają na celu umożliwienie zaprojektowania aparatu, przeznaczonego do prowadzenia testów zarówno w warunkach standardowych wg [1], jak i niestandardowych w szerokim zakresie przepływu i temperatury. Badania niestandardowe prowadzone w wysokich temperaturach są szczególnie ważne w przypadku potrzeby określania zużycia erozyjnego materiałów konstrukcyjnych w warunkach zbliżonych do rzeczywistych warunków eksploatacji.

Dla prawidłowego zaprojektowania wymiennika ciepła podstawowe znaczenie ma poznanie zjawiska rozplywu gazu pomiędzy dyszą dmuchawy a obiektem badanym. W opisie zjawiska szczególnie istotna jest informacja dotycząca wartości ciśnienia panującego w poszczególnych częściach instalacji. Ciśnienie to zależy od strumienia przepływającego gazu, rozkładu temperatury oraz konstrukcji zastosowanego układu.

Wykonane symulacje CFD przepływu gazu, poza określeniem całkowitego spadku ciśnienia (w różnych temperaturach gazu) umożliwiają dodatkowo przeprowadzenie analizy rozplywu strugi (zawierającej cząstki ścierniwa), określenie lokalnego pola ciśnienia, prędkości, temperatury oraz ich wpływu na wyniki prowadzonego na urządzeniu testu.

1. Model rozplywu gazu w mieszalniku oraz komorze roboczej

Zagadnienie rozplywu gazu w mieszalniku oraz komorze testowej aparatu symulowano w oparciu o rozwiązanie układu równań Reynoldsa w ujęciu Eulera sformułowanym metodą objętości skończonej. Do rozwiązania równań Reynoldsa wykorzystano komercyjny solver Fluent [5].

Ogólna postać układu równań Reynoldsa dla przepływu turbulentnego [6]:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial \tau} + (\nabla \cdot vv) \right) = -\nabla p + \nabla R + \rho f \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial \tau} + \nabla \cdot q - p(\nabla \cdot v) + \nabla(R \cdot v) + q_v \quad (3)$$

gdzie:

- ρ – gęstość [kg/m^3],
- v – prędkość [m/s],
- τ – czas [s],
- u – energia wewnętrzna,
- p – ciśnienie,
- R – tensor naprężenia,
- f – siły związane z oddziaływaniem siły ciężkości i innych sił wewnętrznych.

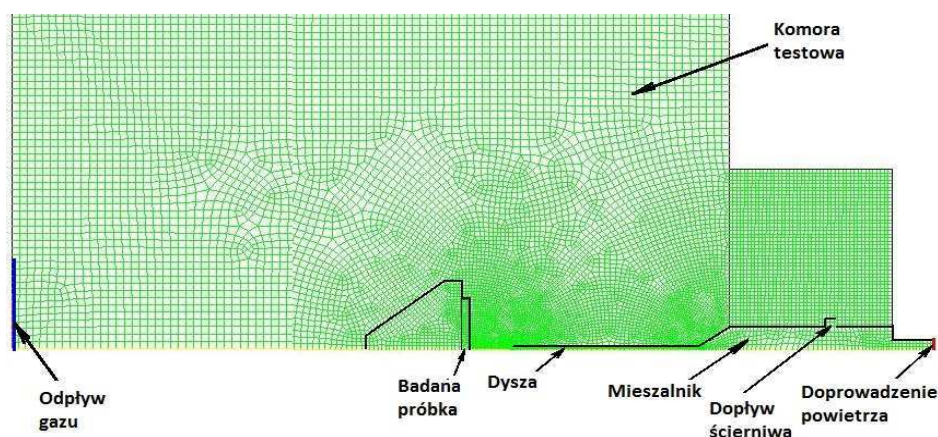
Lewa strona równania (3) opisuje zmianę energii wewnętrznej elementarnej objętości płynu. Prawa strona równania przedstawia dywergencję gęstości konwekcyjnego strumienia energii wewnętrznej $-\nabla \cdot (\rho u v)$, dywergencję gęstości kondukcyjnego strumienia energii wewnętrznej $-\nabla \cdot q = \lambda \nabla^2 T$, gdzie λ oznacza współczynnik przewodzenia ciepła. Człon $-p(\nabla \cdot v)$ opisuje przyrost energii wewnętrznej wynikający z pracy zmiany objętości. Człon q_v oznacza wydajność wewnętrznego źródła ciepła i jest on również związany z nieodwracalnym rozpraszaniem energii kinetycznej na skutek lepkości.

Powyższe równania opisują kolejno bilanse: pędu, masy oraz energii. Lewa strona równania pędu opisywana często jako tzw. pochodna substancjalna [7].

W modelu wykorzystującym metodę objętości skończonych (FVM – *Finite Volume Method*) [6] przyjęto następujące założenia:

- model sprowadzono do zagadnienia osiowo-symetrycznego, zakładając, że próbka badanego materiału ma kształt walca o średnicy 14 mm oraz wysokości 2 mm,
- założono przepływ ściśliwy,
- zastosowano model turbulencji k-epsilon z przybliżeniem warstwy przyściennej przy pomocy Standard Wall Function [6].

Schemat modelu FVM wraz z dyskretyzacją przestrzeni przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat osiowo-symetrycznej przestrzeni modelu przepływu gazu wraz z siatką

Do dyskretyzacji przestrzeni modelu wykorzystano komercyjny generator siatki Gambit. Zastosowano siatkę heksahedralną o rozmiarach elementów zapewniających poprawne działanie zastosowanego w modelu turbulencji k-epsilon modelu Wall Functions jako przybliżenia warstwy przyściennej pomiędzy ścianą a obszarem rozwiniętego przepływu turbulentnego. Ponadto założono, że komora robocza aparatu jest przestrzenią otwartą, tj. połączoną bezpośrednio z atmosferą. Ciśnienie statyczne panujące w przewodzie przed mieszalnikiem równe jest oporom przepływu gazu przez mieszalnik i dyszę. Można założyć, że powietrze opuszczające dyszę rozpręży się do wartości ciśnienia równej ciśnieniu atmosferycznemu. Przyjęto, że temperatura gazu dopływającego do mieszalnika wynosi 650°C . Założono, że ściany komory testowej są powierzchniami adiabatycznymi a całe ciepło dostarczane do komory pochodzi od strumienia powietrza. Ze względu na niewielki udział objętościowy ścierniwa w strumieniu gazu (poniżej 0,5%) wpływ dostarczanego do strumienia gazu ścierniwa został na tym etapie analizy pominięty. Założono, że jego wpływ na opory przepływu oraz bilans pędu jest nieistotny z punktu widzenia analizy przepływu gazu.

2. Badania symulacyjne rozprywu gazu

Symulacja została przeprowadzona dla testu prowadzonego w temperaturze 23°C , co odpowiada średniej z zakresu temperatur określonego w normie [1] oraz dla przypadku, gdy temperatura powietrza doprowadzonego do komory zmieszania wynosi 650°C . Ciśnienie powietrza w przewodzie przed mieszalnikiem dobierano tak, aby średnia prędkość powietrza w przekroju dyszy wynosiła 106 m/s. W tabeli (tab. 1) przedstawiono porównanie gęstości, lepkości kinematycznej, strumieni masowych i objętościowych, powietrza przepływającego

przez układ oraz ciśnienia przed mieszalnikiem w celu osiągnięcia żądanej prędkości strugi opuszczającej dyszę.

Tabela 1. Parametry przepływu dla temperatury powietrza napływającego na próbkę odpowiednio 28°C oraz 650°C.

Temperatura →		23°C	650°C
Strumień masowy	kg/s	0,000213988	0,000070972
Strumień objętościowy w przekroju dyszy	l/min	11,3	10,9
Strumień objętościowy przed mieszalnikiem	l/min	9,5	10,7
Gęstość powietrza przed mieszalnikiem	kg/m ³	1,34	405
Gęstość powietrza w przekroju dyszy	kg/m ³	1,22	0,413
Prędkość średnia	m/s	106,6	106,5
Ciśnienie przed mieszalnikiem	Pa	15000	6100
Maksymalne ciśnienie statyczne na powierzchni próbki	Pa	3258	825
Lepkość kinematyczna	m ² /s	1,51E-005	9,73E-005

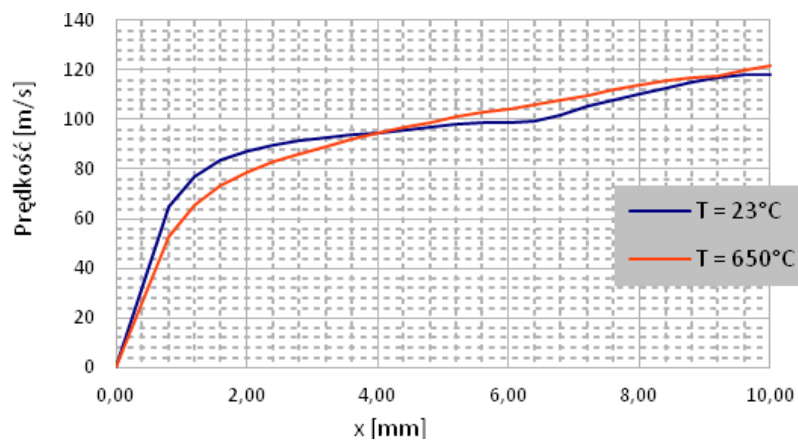
W przypadku wysokiej temperatury gazu, ze względu na trzykrotny spadek gęstości wymagany strumień masowy zmniejszył się trzykrotnie. Lepkość gazu gorącego w stosunku do chłodnego wzrosła natomiast prawie siedmiokrotnie. Ostatecznie spowodowało to około czterokrotne zmniejszenie wartości wymaganego ciśnienia statycznego przed mieszalnikiem dla gazu gorącego.

Na rysunkach 3–6 przedstawiono odpowiednio pole i prędkość powietrza wypływającego z dyszy.

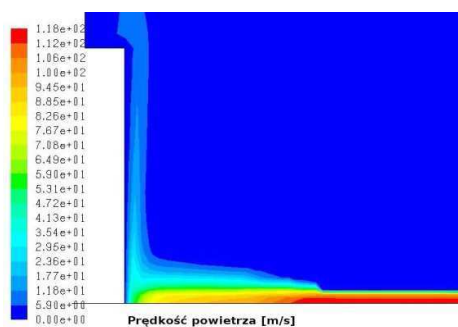
Widoczny jest wpływ zmiany własności gazu na zasięg strugi przy tej samej prędkości wypływu z dyszy. W przypadku gorącego strumienia powietrza o wyższej lepkości i mniejszej gęstości w odległości 1 mm od powierzchni próbki prędkość strugi gazu wynosi około 58 m/s. Dla testu wykonanego w temperaturze otoczenia (23°C), gdzie warstwa przyścienna ma mniejszą grubość, w tej samej odległości prędkość strugi wynosi 70 m/s (rys. 2–4).

Na rysunkach 5–6 przedstawiono wektory prędkości gazu omywającego próbkę.

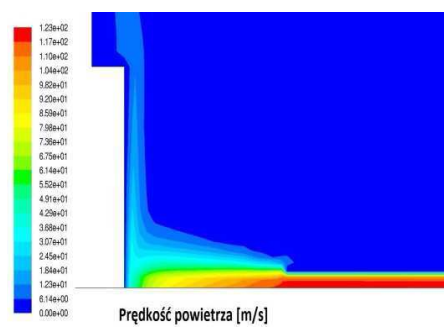
Można zauważyć, że w przypadku przyjętej konfiguracji geometrycznej struga gazu uderza w próbkę w środkowej jej części, a następnie następuje zmiana kierunku strugi, która przemieszcza się prostopadle do próbki z prędkością od 32 m/s w odległości 1 mm od środka próbki do 17 m/s na jej zewnętrznym brzegu (rys. 5–6).



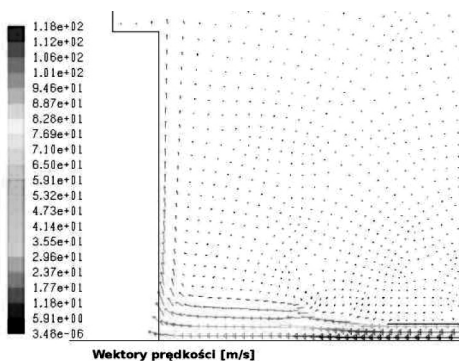
Rys. 2. Prędkość powietrza w osi strugi w funkcji odległości od powierzchni próbki



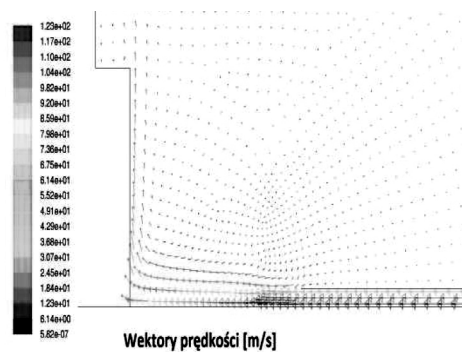
Rys. 3. Pole prędkości powietrza opływającego próbkę dla temperatury 23°C



Rys. 4. Pole prędkości powietrza opływającego próbkę dla temperatury 650°C

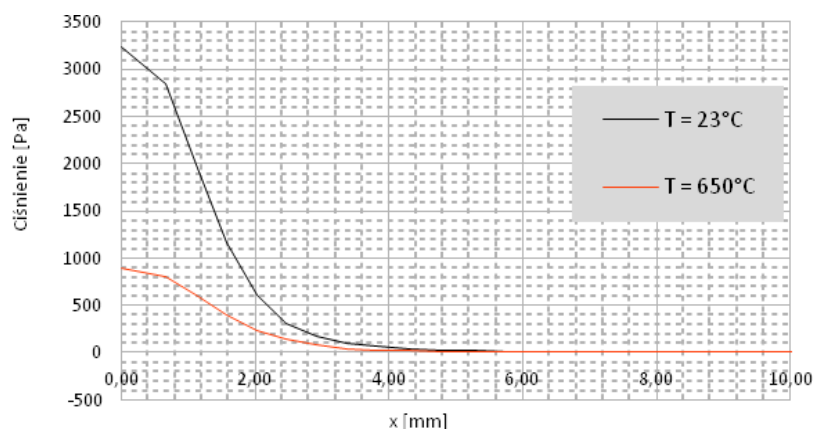


Rys. 5. Wektory prędkości powietrza opływającego próbkę dla temperatury 23°C



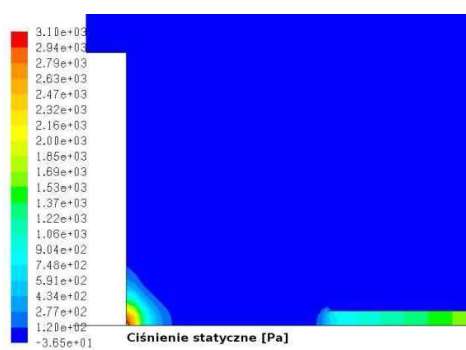
Rys. 6. Wektory prędkości powietrza opływającego próbkę dla temperatury 650°C

Opisany powyżej charakter przepływu wpływa również na pole ciśnienia na powierzchni badanej próbki. Ciśnienie statyczne w środkowej części próbki (rys. 7–8), gdzie w większości występują prostopadłe do powierzchni próbki wektory prędkości wynosi około 3100 Pa dla strugi o temperaturze 23°C oraz 850 Pa w przypadku strugi o temperaturze 650°C.

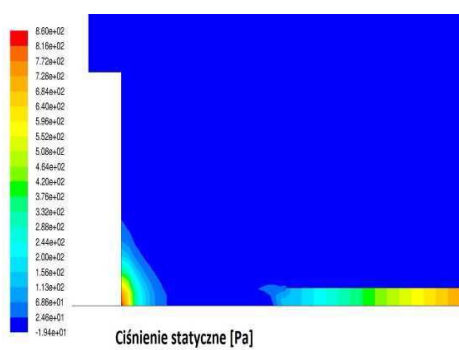


Rys. 7. Rozkład ciśnienia statycznego na powierzchni badanej próbki

Pole ciśnienia przedstawiono na rysunkach 7–9. Na pozostałej części powierzchni próbki ciśnienie jest zbliżone do wartości ciśnienia atmosferycznego.

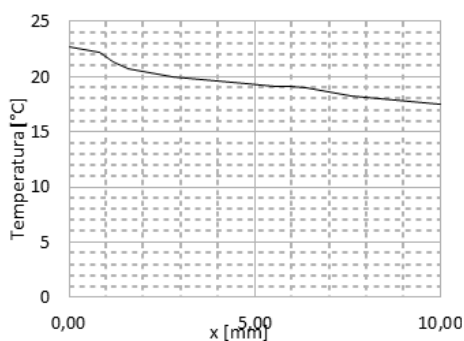


Rys. 8. Ciśnienie statyczne przy temperaturze strugi 23°C

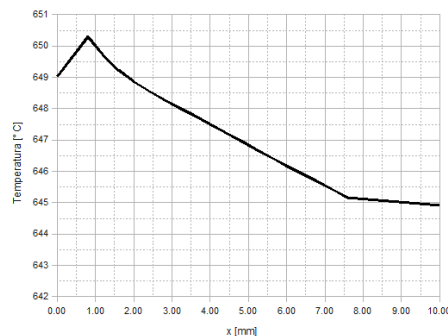


Rys. 9. Ciśnienie statyczne przy temperaturze strugi 650°C

Kolejnym rozpatrywanym zagadnieniem jest pole temperatury analizowanej strugi gazu. Gaz sprężony do wymaganej przed mieszalnikiem wartości ciśnienia oraz (w przypadku testu wysokotemperaturowego) ogrzany w wymienniku do temperatury 650°C w ostatnim odcinku instalacji, który stanowi dysza o długości 50 mm, nabiera prędkości, ulegając stopniowo rozprężeniu aż do ciśnienia atmosferycznego.

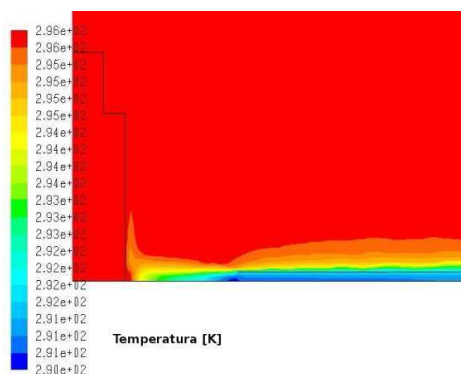


Rys. 10. Temperatura powietrza w osi strugi w funkcji odległości od powierzchni próbki dla temperatury testu 23°C

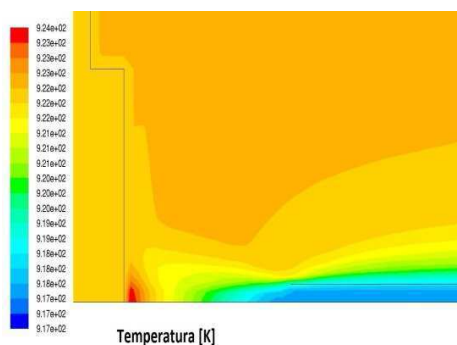


Rys. 11. Temperatura powietrza w osi strugi w funkcji odległości od powierzchni próbki dla temperatury testu 650°C

Poprzez spadek ciśnienia statycznego związany ze wzrostem prędkości w końcowym 50 mm odcinku dyszy temperatura gazu strugi gazu spada o około 5 K. Po wypływie z dyszy gaz na skutek indukcji powietrza z komory roboczej ogrzewa się, osiągając przy powierzchni próbki planowaną temperaturę, w której przeprowadzany jest test, tj. odpowiednio 23°C oraz 649°C w przypadku testu wysokotemperaturowego (rys. 10–13).



Rys. 12. Temperatura strugi powietrza dla temperatury 23°C

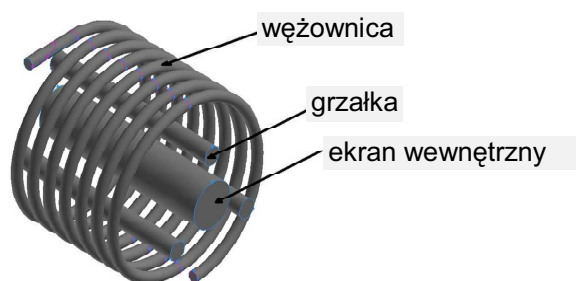


Rys. 13. Temperatura strugi powietrza dla temperatury 650°C

3. Model matematyczny wymiennika ciepła

W celu wykonania badań w podwyższonych temperaturach niezbędny jest specjalny wymiennik ciepła umożliwiający podgrzanie powietrza do wymaganej temperatury.

Zaprojektowano wymiennik, w którym wymiana ciepła będzie realizowana na drodze promieniowania. Wymiennik składa się z 3 grzałek elektrycznych oraz dwóch ekranów, wewnętrznego i zewnętrznego. Pomiędzy ekranami, nad grzałkami znajduje się węzownica (którą przepływa ogrzewane powietrze) w kształcie linii śrubowej (rys. 14).



Rys. 14. Wymiennik ciepła

Na podstawie otrzymanej z symulacji wartości ciśnienia w przewodzie przed mieszalnikiem wynoszącej 6100 Pa oraz dla otrzymanych z symulacji wartości strumienia masowego gazu obliczono spadek ciśnienia gazu w wymienniku ciepła z zależności (4):

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D_w} \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \quad (4)$$

gdzie:

- λ – współczynnik oporów hydraulicznych [–],
- L – długość rury wymiennika [m],
- D_w – średnica wewnętrzna rury [m],
- ρ – średnia gęstość gazu [kg/m³],
- w – prędkość gazu [m/s].

Współczynnik oporów λ został ujęty w algorytmie obliczeniowym instrukcją warunkową wyliczającą wartość dla przepływu laminarnego jako $64/Re$, dla przepływu turbulentnego z zależności Colebrooka-White'a [8]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 D_w} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- λ – współczynnik oporów hydraulicznych [-],
- k – chropowatość wewnętrznej powierzchni rury [m],
- D_w – średnica wewnętrzna rury [m],
- Re – liczba Reynoldsa [-].

Do wyznaczenia powierzchni wymiany ciepła wymiennika zastosowano metodę epsilon-NTU [8], dla której moc cieplna wymiennika określona jest zależnością:

$$Q = \varepsilon \dot{m} C_p (T_G - T_{P1}) \quad (6)$$

gdzie:

- ε – efektywność wymiennika [-],
- C_p – ciepło właściwe [J/kgK],
- \dot{m} – strumień masowy gazu [kg/s],
- T_G – temperatura grzałki [K],
- T_{P1} – temperatura gazu na wylocie do wymiennika [K],

wprowadzając zastępczy radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła [W/(m²*K)]:

$$\alpha_R = \frac{\varepsilon_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_G^4 - T_S^4)}{T_G - T_S} \quad (7)$$

gdzie:

- ε_{1-2} – emisyjność wzajemna układu,
- ε_1 – emisyjność powierzchni grzałek,
- ε_2 – emisyjność powierzchni rury gazowej,
- σ – stała Stefana-Boltzmana [W/m²K⁴],
- T_G – średnia temperatura ścianki grzałki [K],
- T_S – średnia temperatura ścianki zewnętrznej rurki [K].

Znając opory przepływu, wyznaczono ciśnienie przez wymiennikiem. Następnie na podstawie równania stanu gazu doskonałego określono gęstość oraz pozostałe własności cieplne powietrza przed wymiennikiem. Ze względu na nieliniowy charakter modelu do obliczeń zastosowano procedurę iteracyjną.

Parametry pracy zaprojektowanego wymiennika ciepła przedstawiono w tabeli poniżej (tab. 2).

Tabela 2. Parametry pracy wymiennika ciepła

Strumień gazu	m	kg/s	0,000073424
Moc cieplna	Q	W	62
Prędkość powietrza w przewodzie na wlocie	w	m/s	5,9
Prędkość powietrza w przewodzie na wylocie	w	m/s	19,7
Współczynnik przejmowania ciepła od powietrza	h_w	W/m ² K	30,5
Zastępczy radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła	h_{zR}	W/m ² K	74,4
Całkowity współczynnik przenikania ciepła	UA	W/K	269
Number of Transfer Unit	NTU	–	3,56
Efektywność	ϵ	–	0,97
Straty ciepła przez izolację (100 mm)	Q _{st}	W	6,5
Opory przepływu	Δp	Pa	3867

Wnioski

W artykule zaprezentowano zastosowanie metod CFD w procesie projektowania stanowiska badawczego do badań zużycia erozyjnego powierzchni. Norma ASTM G 76 określa szczegółowo, w jakich warunkach należy przeprowadzać tego typu badania, jednakże zdecydowano się je dodatkowo rozszerzyć i przeprowadzać badania w wysokich temperaturach. Jest to szczególnie ważne w przypadku materiałów ogniotrwałych i żaroodpornych, ze względu na ich zużycie erozyjne zachodzące w wysokich temperaturach. Zaprojektowane stanowisko umożliwi (co jest bardzo ważne) badanie tych materiałów w temperaturach zbliżonych do warunków ich pracy.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji CFD (Computational Fluid Dynamic) wyznaczono pole prędkości i ciśnienia w otoczeniu próbki badanego materiału oraz całkowity spadek ciśnienia w dyszy aparatu w skrajnych temperaturach wykonywania badań, tj. 23°C i 650°C.

Taka symulacja jest szczególnie istotna w rozpatrywanym przypadku, gdy przyjęte założenia określają, że średnia prędkość powietrza w dyszy wylotowej powinna sięgać do 100 m/s, w szerokim zakresie temperatur. Bez przeprowadzonych symulacji niemożliwe byłoby określenie warunków początkowych eksperymentu.

Znajomość parametrów powietrza przed komorą mieszania umożliwiła określenie parametrów pracy wymiennika ciepła, co pozwoliło na jego zaprojekt-

towanie. Zdecydowano się na wymiennik, w którym mechanizm wymiany ciepła będzie realizowany na drodze promieniowania.

Przyjęta koncepcja radiacyjnego wymiennika ciepła znaczenie upraszcza jego konstrukcję, która byłaby bardziej skomplikowana w przypadku wymiennika, gdzie głównym mechanizmem transportu ciepła byłaby konwekcja.

W przeprowadzonej analizie, ze względu na niewielki udział objętościowy ścierniwa jego wpływ na warunki przepływu został pominięty.

Symulacja przepływu dwufazowego cząstek materiału w gazie jest jednak uzasadniona z punktu widzenia analizy procesu badania zużycia erozyjnego, gdyż dałaby informację o ich lokalnych prędkościach i energii oraz wpływie masy transportowanych cząstek na bilans pędu, co mogłoby znaleźć zastosowanie w interpretacji otrzymanych wyników badań i co za tym idzie ułatwiłoby planowanie eksperymentu. Symulacja ta będzie przedmiotem dalszych prac badawczych w zakresie budowy aparatu do badań zużycia erozyjnego.

Praca naukowa wykonana w ramach realizacji Programu Strategicznego pn. „Innowacyjne systemy wspomagania technicznego zrównoważonego rozwoju gospodarki” w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. ASTM G 76-07: Standard Test Method for Conducting Erosion Test by Solid Particle Impingement Using Gas Jets.
2. Brüggmann C., Krause O., Pötschke J., Simmat R.: High temperature abrasion resistance of cement-based refractories, *Stahl und Eisen Special*, 48th Int. Coll. On Refractories, Aachen (2005), s. 35–39.
3. Simmat R., Brüggmann C., Krause O., Pötschke J.: High temperature abrasion resistance of refractory products. *Proc. UNITECR'07*, Dresden-Germany.
4. Jedynak L.: Nowa metoda pomiaru odporności na ścierania w aspekcie dokładności uzyskiwanych wyników. *Ceramika* 103, 2007.
5. Fluent Manual, [on line] www.fluentusers.com/fluent63/doc/ori/html/rn/rel_index.htm.
6. Chung T.J.: *Computational Fluid Dynamics*, Cambridge University Press 2003.
7. Wiśniewski S., *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa 1979.
8. Frank Kreith: *Heat and Mass Transfer, Mechanical Engineering Handbook*, CRC Press, 1999.

Recenzent:
Jerzy OSIŃSKI

Numeric simulation of the air flow in the apparatus for erosion wear testing**Key words**

Heat exchanger, erosion, high-temperature testing.

Summary

The article presents the numeric analysis of the flow of gas and the heat calculations performed to allow design of the apparatus for erosion wear testing of the surfaces with use of Mackensens fan method. The CFD (Computational Fluid Dynamic) simulations were performed allowing the determination of the velocity and pressure field in the proximity of the tested sample and the drop of the pressure in the jet of the apparatus. The simulation testing were performed for the flow in the room temperature and in the high-temperature conditions