

## AN INFLUENCE OF ROTATIONAL VELOCITY ON HEAT LOSSES TO WALL DURING GAS MIXTURES COMBUSTION IN ROTATING COMBUSTION CHAMBER

Andrzej Gorczakowski, Jozef Jarosinski, Stanislaw Jedrzejowski

Technical University of Lodz, Department of Heat Technology and Refrigeration  
ul. Stefanowskiego 1/15 Lodz, Poland  
tel.: +48 42 6367481, fax: +48 42 6367481  
e-mail: gandrzej@p.lodz.pl, jarosin@p.lodz.pl, sjedrzej@p.lodz.pl

### Abstract

The measurement results gathered during experimental investigations on specially constructed experimental stand have been presented. The stand allows for signal and data transmission of wall temperature changes in rotating combustion chamber towards non-moving data acquisition system. The measurements of temperature changes of combustion chamber have been done with use of special thermoelements located in front wall on surfaces with different radius for propane-air mixtures with from 2.86 up to 4.0% $C_3H_8$  and rotating velocities from 1000 to 5000 rpm. Using the dependence between surface temperature and heat flux transferred to wall, the heat flux has been calculated, after solving one dimensional of heat conduction problem in half finished body with limit conduction changeable in time. Schematic diagram of the experimental apparatus for measuring wall temperature, schematic view of thermocouple joint in the front wall of combustion chamber, measured profiles of temperature changes in the combustion chamber wall surface, flame propagation in rotating combustion chamber, calculated heat flux densities to the wall for mixture propane-air mixture are presented in the paper.

**Keywords:** combustion processes, swirl burning, internal combustion engines

## WPLYW SZYBKOSCI WIROWANIA NA STRATY CIEPŁA DO ŚCIANKI PRZY SPALANIU MIESZANEK GAZOWYCH W WIRUJĄCEJ KOMORZE SPALANIA

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów na zbudowanym stanowisku badawczym pozwalającym na transmisję sygnału zmiany temperatury ścianki w wirującej komorze spalania do nieruchomego układu akwizycji danych. Wykonano pomiary zmian temperatury powierzchni ścianki komory spalania specjalnymi termoelementami umieszczonymi w czołowej ściance na jej powierzchni na różnych promieniach, dla mieszanek propan-powietrze o składach od 2,86 do 4,0% $C_3H_8$  i szybkościach wirowania od 1000 do 5000 obr/min. Wykorzystując zależność pomiędzy temperaturą powierzchni a strumieniem wnikającego ciepła obliczono strumień wnikającego ciepła, rozwiązując jednowymiarowe zagadnienie przewodzenia ciepła w ciele półnieskończonym przy zmiennym w czasie warunku brzegowym. Schemat stanowiska do pomiaru temperatury ścianki, schemat umieszczenia spiny termoelementu w ściance czołowej komory spalania, zmierzone przebiegi zmian temperatury<sub>1</sub> powierzchni ścianki komory spalania, rozprzestrzenianie się płomienia w wirującej komorze spalania. obliczone gęstości strumienia ciepła do ścianki dla mieszanki propan-powietrze są przedstawione w artykule.

**Słowa kluczowe:** procesy spalania, spalanie w wirze, silniki wewnętrznego spalania

### 1. Wstęp

Wirowanie mieszanki palnej traktowanej jako ciało sztywne w cylindrycznej komorze spalania stwarza możliwość badania rozprzestrzeniania się laminarnego płomienia i jego gaszenia w polu działania sił większych od grawitacyjnych dla warunków granicznych różniących się w

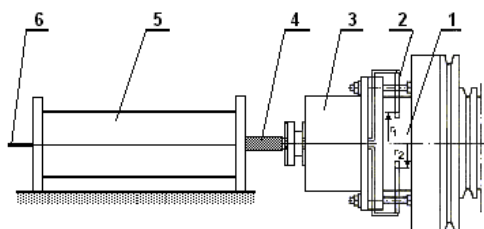
sposób zasadniczy od zwykle występujących. Analiza zachowania się płomieni rozprzestrzeniających się w mieszkach o różnych składach pozwala na lepsze zrozumienie mechanizmu propagacji płomienia i jego gaszenia. Wiedza o pewnych globalnych parametrach charakteryzujących rozprzestrzenianie się płomienia laminarnego oraz zrozumienie mechanizmów gaszenia jest bardzo ważna zarówno w zastosowaniach praktycznych jak i przy modelowaniu tego typu procesów.

Ciepło wydzielone podczas spalania mieszanki w wirującej komorze spalania powoduje wzrost energii wewnętrznej ładunku komory spalania a gorące spaliny stykające się ze ścianką przekazują do ścianek ciepło stanowiące stratę. Wymiana ciepła między gorącymi spalinami a ścianką wirującej komory w czasie spalania mieszanki stanowi zagadnienie niestabilnej wymiany ciepła. Określenie ilości ciepła jest ważne w analizie bilansu komory spalania.

## 2. Stanowisko badawcze

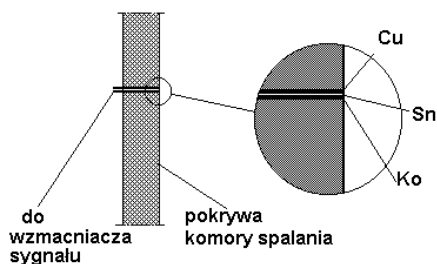
Badania prowadzono w wirującej cylindrycznej przezroczystej komorze spalania wykonanej ze szkła organicznego o poziomej osi wirowania (rys. 1). Eksperymenty wykonano dla komory o średnicy wewnętrznej 90 mm i długości 30 mm. W komorze spalano mieszanki gazowe propanu z powietrzem.

W celu określenia ilości ciepła przekazywanego przez spaliny do ścianek komory spalania wykonano pomiary zmian temperatury powierzchni ścianki komory spalania termoelementami umieszczonymi na promieniach 23 i 28 mm (rys. 2), dla mieszanek propan – powietrze o składzie  $2,86 \div 4,0\%C_3H_8$  i szybkości wirowania  $1000 \div 5000$  obr/min.



Rys. 1. Schemat stanowiska do pomiaru temperatury ścianki: 1 – komora spalania, 2 – czujnik termoelektryczny, 3 – układ wzmacniaczy pomiarowych, 4 – sprzęgło elastyczne, 5 – rtęciowy układ przeniesienia sygnału, 6 – przewody sygnałowe

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus for measuring wall temperature: 1 – combustion chamber, 2 – thermoelectric sensor, 3 – system of measuring amplifiers, 4 – flexible clutch, 5 – mercury signal transferring system, 6 – signal wires



Rys. 2. Schemat umieszczenia spoiny termoelementu w ściance czołowej komory spalania; Cu– drut miedziany, Ko – drut konstantanowy, Sn – rozrta cyna jako metal pośredniczący

Fig. 2. Schematic view of thermocouple joint in the front wall of combustion chamber; Cu – copper wire, Ko – constantan wire, Sn – tin thin layer as indirect metal

Pomiar temperatury ścianki wirującej komory spalania wykonywano przy zastosowaniu czujników termoelektrycznych miedź-konstantan-cyna. Schemat umieszczenia czujników w ścianie przedstawia rys. 2.

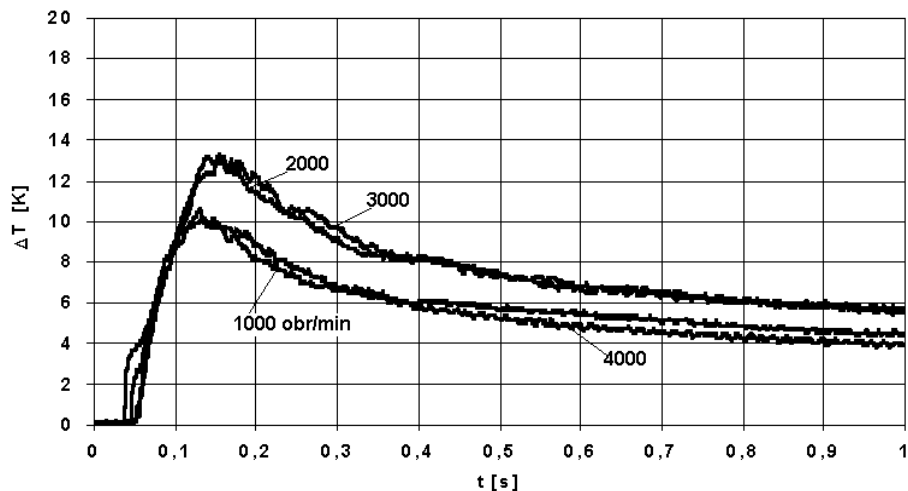
Czujniki termoelektryczne mocowano w pokrywie (ścianie czołowej) komory spalania w taki sposób, że elementy czynne czujników znajdowały się wewnątrz komory spalania na określonych promieniach. Spoinę pomiarową stanowi roztrąta cyna (o pomijalnej pojemności cieplnej) łącząc druty miedziany i konstantanowy.

Sygnał pomiarowy (siłę termoelektryczną) wzmacniano układem wzmacniacza wirującego razem z komorą spalania. Sygnał wyjściowy ze wzmacniacza przesyłano ręciovym układem przeniesienia sygnału i rejestrowano w układzie akwizycji danych.

### 3. Wyniki pomiarów

Po określeniu stałych fizycznych dla czujników termoelektrycznych i przecechowaniu układu wykonywano pomiary zmian temperatury powierzchni ścianki komory spalania termoelementami umieszczonymi na promieniach 23 i 28 mm, dla mieszanek ubogich propan – powietrze o składzie  $2,86 \div 4,0\%C_3H_8$  i szybkości wirowania  $1000 \div 5000$  obr/min. Jednocześnie rejestrowano obraz boczny rozprzestrzeniania się płomienia.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi zarejestrowanych zmian temperatury powierzchni ścianki komory spalania. Rozprzestrzeniający się płomień osiąga promień 23 mm w dla szybkości wirowania 1000 obr/min czasie 0,030 s i 4000 obr/min w czasie 0,053 s dla mieszanki  $3,5\%C_3H_8$ . Temperatura powierzchni ścianki doznając impulsu cieplnego gwałtownie wzrasta, osiąga maksimum a następnie omywana ochłodzonymi spalinami maleje.

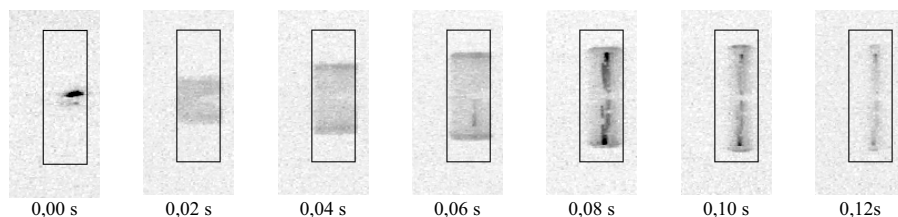


Rys. 3. Zmierzone przebiegi zmian temperatury  $T_1$  powierzchni ścianki komory spalania. Mieszanka propan-powietrze o składzie 3,5 %  $C_3H_8$ , prędkość obrotowa 1000 - 4000 obr/min

Fig. 3 Measured profiles of temperature changes in the combustion chamber wall surface. Propane-air mixture 3.5 %  $C_3H_8$ , rotational speed 1000 – 4000 rpm

Rysunek 4 przedstawia rozprzestrzenianie się płomienia w wirującej komorze spalania dla mieszanki propan-powietrze o składzie  $3,5\%C_3H_8$  i prędkości obrotowej 4000 obr/min.

Wyznaczone przebiegi zmian temperatury  $T(\tau)$  powierzchni ścianki (po wygładzeniu) wykorzystano do obliczeń numerycznych strumienia ciepła odprowadzanego przez ścianki boczne w wirującej komory spalania.



Rys. 4. Rozprzestrzenianie się płomienia w wirującej komorze spalania. Mieszanka propan-powietrze o składzie 3,5 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, prędkość obrotowa 4000 obr/min (widok z boku)

Fig. 4. Flame propagation in rotating combustion chamber. Mixture propane-air 3.5 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, rotational speed 4000 rpm (side view)

#### 4. Metodyka obliczeń lokalnego strumienia ciepła

Zależność pomiędzy temperaturą powierzchni a strumieniem wnikającego ciepła otrzymuje się rozwiązując jednowymiarowe zagadnienie przewodzenia ciepła w ciele półnieskończonym przy zmiennym w czasie warunku brzegowym [1, 2, 3]. Jeżeli  $T(t)$  jest funkcją temperatury powierzchni w czasie to gęstość strumienia wymianianego ciepła  $q$  w chwili  $t$  można opisać równaniem

$$q(t) = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t-\tau}} \frac{dT}{d\tau} d\tau \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right], \quad (1)$$

gdzie:

$\lambda$  - współczynnik przewodności cieplnej materiału ścianki,

$\rho$  - gęstość materiału ścianki,

$c$  - ciepło właściwe materiału ścianki.

Równanie (1) można rozwiązać gdy znana jest funkcja  $T(t)$ . W badaniach eksperymentalnych używane są układy akwizycji danych, które rejestrują zadane wielkości w postaci ciągu dyskretnych wartości. Przybliżając pochodną temperatury po czasie w danym kroku  $i$  przez iloraz różnicowy  $\Delta T_i / \Delta \tau_i$  otrzymamy

$$q(t_n) = \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi}} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i}{\Delta \tau_i} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{1}{\sqrt{t_n - \tau}} d\tau, \quad (2)$$

Pomiary rejestrowane są ze stałym krokiem czasowym  $\Delta \tau$  a zatem czas w chwili  $i$  jest równy  $t_i = i \cdot \Delta \tau$ . Uwzględniając to i rozwiązując całkę równania (2) otrzymuje się wygodną do zależności do numerycznych obliczeń lokalnej wartości gęstości strumienia ciepła

$$q(t_n) = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \Delta \tau}} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{i-1}) (\sqrt{n-i+1} - \sqrt{n-i}), \quad (3)$$

gdzie:

$i, n$  – numery kroków czasowych.

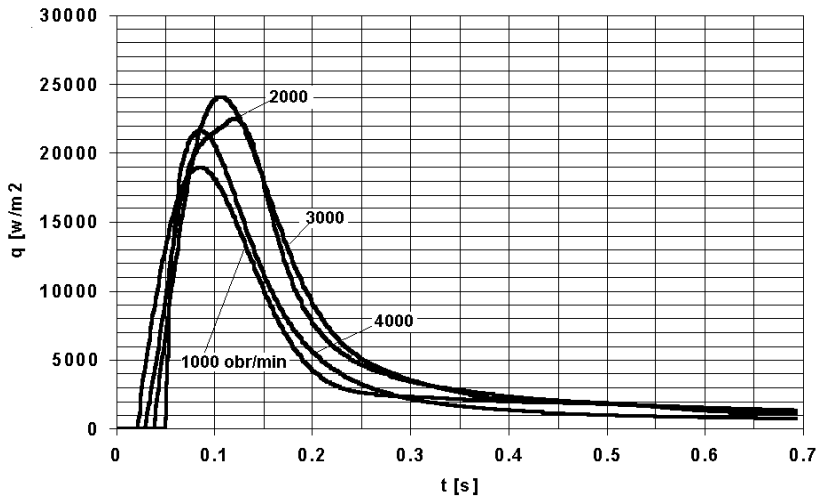
Krok czasowy należy przyjąć wystarczająco mały dla uzyskania dostatecznej dokładności obliczeń.

#### 4. 1. Obliczenia lokalnego strumienia ciepła

Obliczenia gęstości strumienia ciepła wykonano używając programu Mathcad. Własności fizyczne materiału ścianki komory spalania przedstawia tablica 1.

Tab. 1. Właściwości fizyczne ścianki komory spalania – polimetakrylan metylu (plexiglas)  
 Tab. 1. Physical features of the combustion chamber wall - plexiglass

Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Ciepło właściwe [J/kg K]	Współczynnik przewodności cieplnej [W/m K]
1180	1400	0,19



Rys. 5. Obliczone gęstości strumienia ciepła do ścianki dla mieszanki propan-powietrze o składzie 2,86 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> i 3,0 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, prędkość obrotowa 4400 obr/min

Fig. 5. Calculated heat flux densities to the wall for mixture propane-air mixture 3.5 % C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, rotational speed 1000 – 4000 rpm

Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- Krok czasowy Δτ = 0,001 [s],
- (z takim krokiem czasowym rejestrowano temperaturę w czasie pomiarów).
- Ilość danych pomiarowych branych do obliczeń l = 693.
- Numery kroków czasowych i = 1..l,  
n = 1..l.

Procedura obliczeniowa:

- Czytanie danych T<sub>i</sub> := Read(C:\Dane temperatury\temp 01.prn) .

- Obliczenia wielkości *a*

$$a = 2 \sqrt{\frac{\lambda \rho c}{\pi \Delta \tau}} \quad a = 1,999 \cdot 10^4 \text{ [W/m}^2 \text{ K]} .$$

- Obliczanie gęstości strumienia ciepła t = 0      q<sub>0</sub> = 0 .
- Obliczanie gęstości strumienia ciepła t = t<sub>n</sub>    q<sub>n</sub> .

$$q(t_n) = a \sum_{i=1}^n (T_i - T_{i-1}) (\sqrt{n-i+1} - \sqrt{n-i}).$$

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe obliczone wartości gęstości strumienia ciepła do ścianki dla mieszanki propan-powietrze o składzie 3,5 %C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> i szybkości wirowania 1000 – 4000 obr/min.

## 5. Wnioski

Opracowana technika pomiaru temperatury ścianki w wirującej komorze spalania oraz metoda obliczeń pozwala określać straty ciepła do ścianek. Dysponując obliczonymi wartościami strumienia ciepła i znając zmianę wielkości powierzchni kontaktu płomienia i spalin ze ściankami czołowymi w funkcji czasu i promienia można wykonać pełny bilans ciepła komory spalania.

## Literatura

- [1] Carslaw, H. S. & Jaeger, J. C., *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press, Oxford 1959.
- [2] Hall, G. J. & Herzberg, A., *Recent advances in transient Temperature Thermometry, Jet Propulsion*, 11, pp. 719-723, 1958.
- [3] Jedrzejowski, S., *Numerical processing of the eroding thermocouple signals to heat transfer analysis in the reciprocating compressor*, Proc. Heat Transfer '98, Cracow, 1998.