

## WYKORZYSTANIE KALORYMETRYCZNEJ METODY POMIAROWEJ W BADANIACH STRUMIENI CIEPŁA W SILNIKU Z WIRUJĄCĄ FAŁĄ DETONACYJNĄ

KAMIL SOBCZAK

*Institut Lotnictwa, Centrum Technologii Kosmicznych  
Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Warszawska (Wydział MEiL)*

### Streszczenie

*W pracy przedstawiono opis obliczeń projektowych i wykorzystanie metody kalorymetrycznej do wyznaczenia obciążeń cieplnych w komorze spalania silnika wykorzystującego zjawisko wirującej detonacji. Oszacowanie strumienia ciepła na jaki narażone będą ścianki komory spalania to jeden z kluczowych parametrów z jakim należy się zmierzyć w trakcie opracowywania jednostki napędowej.*

*Z tego względu opracowano stanowisko badawcze, dzięki któremu możliwe będzie wyznaczenie wartości strumienia ciepła, na podstawie zmiany entalpii czynnika chłodzącego. W oparciu o wyniki eksperymentalne opracowany zostanie model wymiany ciepła, który wykorzystany zostanie podczas rozwijania kodów numerycznych.*

*Słowa kluczowe: strumień ciepła, silnik z wirującą falą detonacyjną, model wymiany ciepła.*

### WPROWADZENIE

Niniejsza praca zawiera opis metodologii projektowania i pomiarów używanych do badań strumieni ciepła do ścian komory spalania silnika z wirującą falą detonacyjną.

Możliwość praktycznego zastosowania detonacji jako efektywniejszego, w porównaniu do tradycyjnego spalania deflagacyjnego, procesu spalania mieszanin w silnikach badana jest od ponad 60 lat [1]. Mimo to dotychczasowy rozwój silników detonacyjnych pozostaje na etapie prac ideowych lub we wczesnym stadium laboratoryjno – wdrożeniowym [2, 3].

Największe szanse realizacji budowy napędu wykorzystującego proces detonacji gazowej uzyskano w oparciu o koncepcje silników PDE [4] (Pulsed Detonation Engine) oraz RDE [5] (Rotating Detonation Engine). Analiza prac prowadzonych przez uznane ośrodki badawcze pozwala na zdefiniowanie trudności, które w głównej mierze wpływają na możliwości aplikacyjne detonacji w układach napędowych, a dotyczą one zagadnień:

- zapewnienia szybkiego mieszania paliwa z utleniaczem przy wysokich prędkościach przepływu,
- zapłonu i utrzymania detonacji o ściśle określonym i dającym się kontrolować zachowaniu,
- sprawności systemów chłodzenia dla szybkiego odbierania ciepła ze ścian komory spalania.

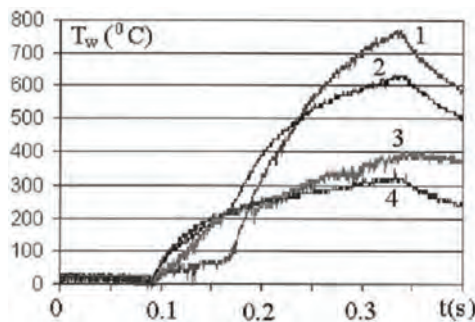
Badania nad napędami RDE są prowadzone na Politechnice Warszawskiej oraz w Instytucie Lotnictwa [6, 7]. Zagadnienia inicjacji i propagacji wirującej fali detonacyjnej były tematem szeregu prac doktorskich realizowanych m. in. przez Kindrackiego [8], Folusiaka [9] i Świdzkiego [10].

## CEL BADAŃ

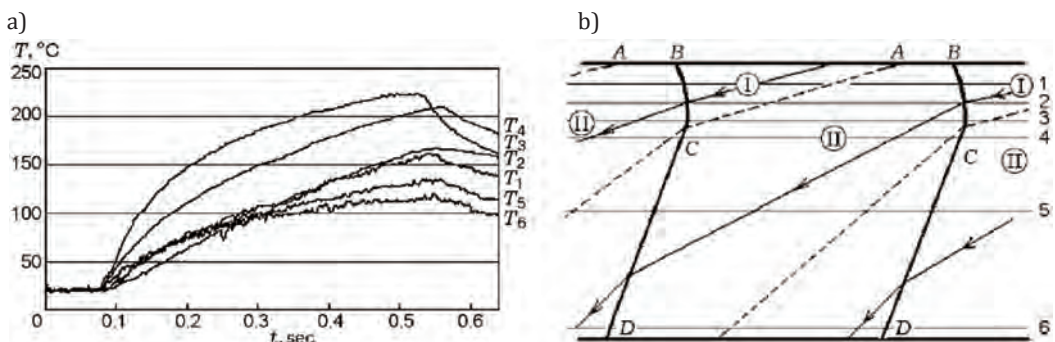
Obciążenia cieplne to jeden z głównych parametrów, który należy uwzględnić podczas każdego procesu projektowania komór spalania.

W celu określenia obciążeń termicznych najczęstszym pierwszym przybliżeniem wykorzystywanym do pomiarów pól temperatury w ścianie jest akumulacyjna konstrukcja komory spalania. Takie rozwiązanie, mimo ograniczeń ze względu na krótki czas pracy silnika, pozwala na wstępne oszacowanie strumieni ciepła.

Tego typu komory spalania z wirującą falą detonacyjną były obiektem badań prowadzonych przez Falempin [11] oraz Bykovskiego i Vedernikowa [12]. W toku tych badań szczególny akcent położono na określenie wartości strumieni ciepła wzdłuż długości komór spalania. Rezultaty tych prac potwierdziły tezę, iż najbardziej obciążoną cieplnie strefą komory spalania jest obszar wirowania czoła fali detonacyjnej. Średnia wartość strumieni ciepła, oszacowana na bazie charakteru zmian mierzonych temperatur (rys. 2), dla mieszanin wodoru z tlenem mieści się w zakresie 12 do 15 MW/m<sup>2</sup>; dla mieszanin w których paliwem był acetylen lub wodór, a utleniaczem powietrze jest porównywalna z wartościami strumieni ciepła wynikającymi ze spalania deflagacyjnego i ich wartość to ~1 MW/m<sup>2</sup>.



Rys. 1. Profile temperatur mierzonych w 4 punktach komory [11]



Rys. 2. Profile temperatur mierzonych w 6 punktach komory (a) oraz zdefiniowane przekroje w odniesieniu do propagującej fali detonacyjnej (b) [12]

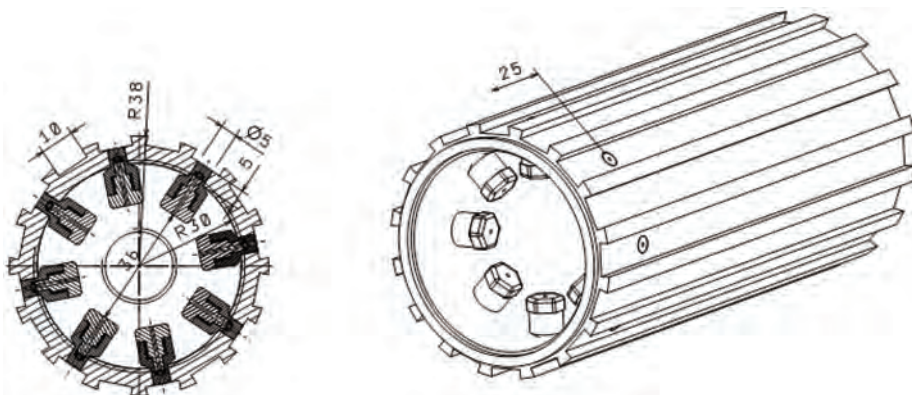
Mankamentem prezentowanych powyżej badań jest ograniczony czas poszczególnych eksperymentów. Wynika on z ciągłego wzrostu temperatury ściany, powodującego zmianę warunków propagacji fali detonacyjnej a przez to nie możliwe jest oszacowanie wartości strumienia ciepła dla stanu ustalonego.

Dlatego słuszne wydaje się podejście wykorzystania aktywnego chłodzenia ściany komory spalania, które pozwoli na wydłużenie czasu pracy silnika, a przez to ustabilizowanie pola temperatury, jak również na wykorzystanie metody kalorymetrycznej do pomiaru całkowitego strumienia ciepła. Określenie wartości całkowitego strumienia ciepła, na podstawie poniższego wzoru, bazuje na pomiarze wydatku czynnika chłodzącego oraz zmianie jego entalpii.

$$q = \frac{[h_{t,wy}(p_{wy}, T_{wy}) - h_{t,we}(p_{we}, T_{we})] \cdot \dot{m}}{A_s} \quad (1)$$

gdzie:  $h_{t,we}$ ,  $h_{t,wy}$  – entalpia,  $p$  – ciśnienie,  $T$  – temperatura,  $\dot{m}$  – wydatek masowy,  $A_s$  – powierzchnia ściany.

Zmiana entalpii czynnika chłodzącego (woda) wyznaczona zostanie poprzez pomiar parametrów, temperatura i ciśnienie, czynnika chłodzącego na wlocie i wylocie kanału chłodzenia. Również umieszczenie termopar (kanały chłodzące – rys. 3) w przekroju, odpowiadającemu strefie propagacji czoła fali detonacyjnej, pozwoli na uzyskanie informacji o entalpii czynnika chłodzącego w tym przekroju.



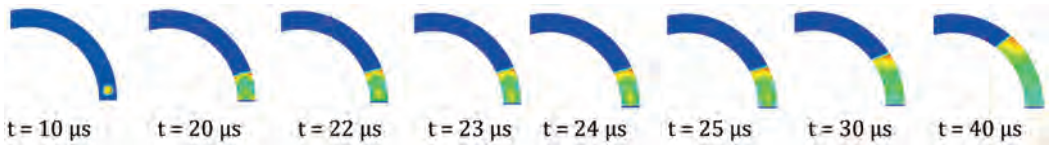
Rys. 3. Złożenie rury wewnętrznej z żebrami kanałów chłodzących oraz portami termopar

#### WYBRANE ETAPY PROCESU PROJEKTOWANIA

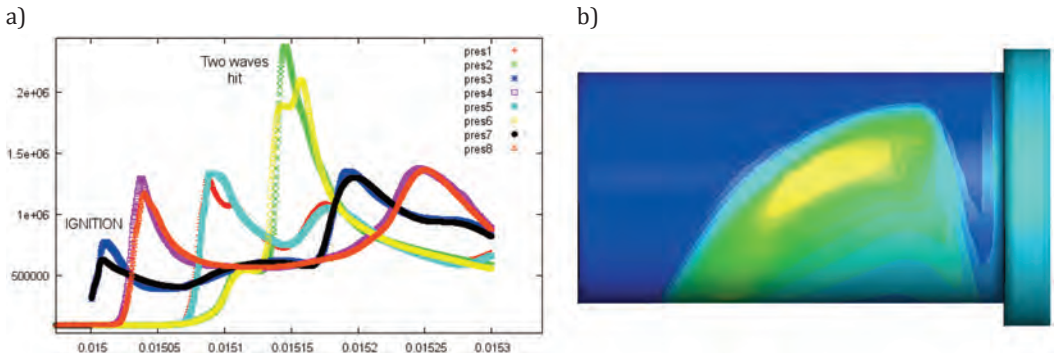
Symulacje (2D, 3D) propagacji fali detonacyjnej w mieszaninie metanowo-tlenowej przeprowadzono przy wykorzystaniu kodu REFLOPS [13] – program do modelowania przepływów nielepkich z możliwością rozwiązywania równań chemii spalania. Celem symulacji było sprawdzenie możliwości inicjacji i stabilności propagacji fali detonacyjnej w projektowanej komorze spalania. Do modelowania reakcji spalania zaadaptowano jednokrokowy mechanizmu reakcji dla metanu i tlenu opisany równaniem Arrheniusa:

$$k = A \cdot T^B \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (2)$$

gdzie:  $A = 4.5 \times 10^5$ ,  $B = 0.0$ ,  $E_a = 30\ 000$ .



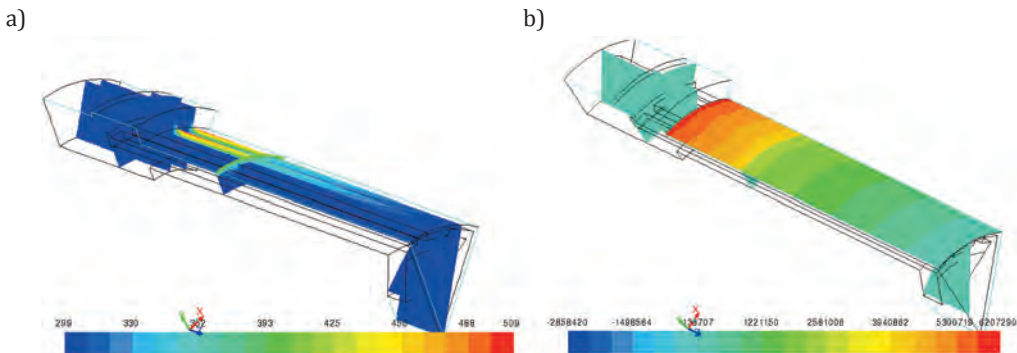
Rys. 4. Wyniki symulacji 2D inicjacji i propagacji fali detonacyjnej – rozkład pola ciśnienia



Rys. 5. Wyniki symulacji 3D inicjacji i propagacji fali detonacyjnej: a) odczyty ciśnienia w punktach pomiarowych, b) rozkład pola ciśnienia

Analizy układu chłodzenia zostały wykonane dla dwóch konfiguracji – 8 i 16 kanałów chłodzenia, założono jednakową geometrię kanałów – przekrój prostokątny o wymiarach 3 x 10 mm. Do wyliczenia wartości strumieni ciepła wykorzystano teoretyczny model używany w pracach Nicholls'a, Cullen'a, Sichel'a i David'a [14]:

$$q_w = \frac{(h_r - h_w) \cdot \tau_w}{(V_D - V_\ell) Pr_m^{2/3}} \quad (3)$$



Rys. 6. Mapy rozkładu pól dla przypadku II konfiguracji kanałów chłodzących i ciśnienia zasilania 8 bar: a) temperatury, b) strumieni ciepła

Obliczenia, których celem było określenie minimalnego ciśnienia zasilania pozwalającego na bezpieczną pracę układu chłodzenia – maksymalna temperatura ściany mniejsza niż 300°C [15] oraz brak pary wodnej na wylocie z kanału chłodzącego – wykonano w programie Fluent wykorzystując modele uwzględniające:

- przepływ wielofazowy,

- nierównowagowy model wrzenia (RPI),
- właściwości mosiądzu w funkcji temperatury oraz właściwości wody – krzywa wrzenia.

Dla konfiguracji z 16 kanałami chłodzenia wynikiem obliczeń, przy jednoczesnym spełnieniu warunków bezpiecznej pracy (tab. 1), jest strumień ciepła na poziomie  $6,2 \text{ MW/m}^2$ . Wartość ta w odniesieniu do wcześniej prezentowanego stanu wiedzy może być uznana za prawdopodobną, jednak dopiero badania eksperymentalne pozwolą na weryfikację i ocenę przyjętej metodologii procesu projektowania komory spalania z wirującą falą detonacyjną.

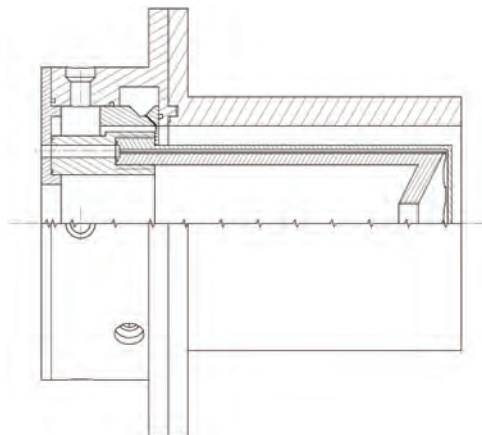
Tab. 1. Wyniki analiz wartości temperatury maksymalnej ściany i obecności gorącej pary na wylocie z kanałów chłodzenia

	I konfiguracja – 8 kanałów	II konfiguracja – 16 kanałów
Ciśnienie zasilania [bar]	2,5	
$T_{\text{max}}$ – ścianki [K]	1 098	850
Udział pary wodnej na wylocie [%]	55	32
Ciśnienie zasilania [bar]	8,0	
$T_{\text{max}}$ – ścianki [K]	712	509
Udział pary wodnej na wylocie [%]	12	0

#### KOMORA SPALANIA Z WIRUJĄCĄ FALĄ DETONACYJNĄ

Komora detonacyjna (rys. 7) składa się z sześciu głównych części:

- zewnętrzna ściana komory spalania to grubościenna rura z kołnierzem, w której umiejscowione są porty pozwalające na montaż czujników ciśnienia oraz inicjator,
- wewnętrzna ściana komory spalania – złożona z dwóch elementów – stanowiąca system chłodzenia,
- pierścień łączący oba elementy układu chłodzenia jest kolektorem wylotowym czynnika chłodzącego,
- głowica wtryskowa paliwa i utleniacza z portami pomiarowymi (w kolektorach zasilających) dla czujników ciśnienia i temperatury,
- wymienna wkładka z otworami dolotowymi utleniacza i paliwa,
- kołnierz łączący głowicę wtryskową z pierścieniem.



Rys. 7. Schemat komory detonacyjnej



Plan badań zakłada zmianę składu mieszaniny palnej w celu określenia stabilnych warunków pozwalających na propagację wirującej fali detonacyjnej. Realizacja formowania odpowiednich składów mieszaniny możliwa będzie poprzez zmiany konstrukcyjne – różne konfiguracje wkładki, jak również dla danej konfiguracji dobór ciśnień zasilania.

Stabilności propagacji wirującej fali detonacyjnej mierzona będzie przy użyciu piezoelektrycznych czujników ciśnienia. Na podstawie odczytów ciśnień, czujniki rozmieszczone obwodowo, możliwe będzie porównanie prędkości wirowania fali detonacyjnej z teoretycznymi prędkościami wynikającymi z modelu Chapmana-Jouguet'a [16].

## PODSUMOWANIE

W trakcie realizacji badań, przy użyciu metody kalorymetrycznej oraz pomiarów termoparowych, z parametrów, które podlegać będą analizie wysunięte zostaną wnioski na temat:

- wartości i charakteru zmian strumieni ciepła w czasie,
- określenia strefy najbardziej obciążonej cieplnie,
- wpływu chłodzenia na stabilność i propagację detonacji.

W oparciu o wyniki eksperymentalne weryfikacji podlegał będzie model wymiany ciepła, który wykorzystany został podczas procesu projektowania.

## LITERATURA

- [1] Nicholls, J. A., Wilkinson, H. R., Morrison, R. B. (1957). *Jet. Propul.* 27 (5), pp. 534-541.
- [2] Ashford, S. A., Emanuel, G. (1996). Oblique detonation wave engine performance prediction, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 12, No. 2, pp. 322-327.
- [3] Zheng, Q., Weng, Ch., Bai, Q. (2013). Experimental Research on the Propagation Process of Continuous Rotating Detonation Wave, *Defence Technology*, Vol. 9, Issue 4, Pages 201-207.
- [4] Roy, G. D., Frolov, S. M., Borisov, A. A., Netzer, D. W. (2004). Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective, *Prog Energy Combust Sci*, 30 (6), pp. 545-672.
- [5] J. Kindracki, A. Kobiera, P. Wolański, Experimental and numerical research on rotating detonation in small rocket engine model, *Combustion Engines – Silniki Spalinowe*, Nr 2009-SC2, 2009.
- [6] Wolański, P. (2013). Detonative Propulsion, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, pp. 125-158.
- [7] Wolański, P. Research on Application of Continuously Rotating Detonation Combustion Chamber to Turbine Engine.
- [8] Kindracki, J. (2008). Badania eksperymentalne i symulacje numeryczne procesu inicjacji wirującej detonacji gazowej, *Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska.*
- [9] Folusiak, M. (2014). Development of simulation methods of rotating detonation in complex geometries, *Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska.*
- [10] Świdorski, K. (2014). Numerical modelling of the rotating detonation combustion chamber, *Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska.*
- [11] Falempin, F. (2008). Continuous Detonation Wave Engine. *Advances on Propulsion Technology for High-Speed Aircraft. Educational Notes RTO-EN-AVT-150, Paper 8: 1-16.*
- [12] Bykovskii, F. A., Vedernikov, E. F. (2009). Heat Fluxes to Combustor Walls during Continuous Spin Detonation of Fuel-Air Mixtures, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 45, No. 1, pp. 70-77.
- [13] Kobiera, A., Świdorski, K., Folusiak, M., Wolański, P. (2009). "REFLOPS" – a New Parallel CFD Code for Reactive Euler Flow Simulation, *Archivum Combustionis*, Vol. 29, No. 3-4.

- [14] Nicholls, J. A., Cullen, R. E. (1962-1964). The feasibility of rotating detonation wave rocket motor, Final report, University of Michigan.
- [15] Broniewski, W., Wesołowski, K. (1934). Zależność mechanicznych własności mosiądzów od temperatury, Prace Zakładu metalurgiczne, Politechnika Warszawska.
- [16] Nettleton, M. A. (1987). Gaseous Detonations: Their Nature, Effects and Control, Butterworths, London, UK.
- [17] Lamoureux, N., Paillard, C. E., Vaslier, V. (2002). Low hydrocarbon mixtures ignition delay times investigation behind reflected shock waves, Shock Waves, pp. 309-322.
- [18] Zhang, Y., Huang, Z., Wei, L., Zhang, J., Law, CH. (2012). Experimental and modeling study on ignition delays of lean mixtures of methane, hydrogen, oxygen and argon at elevated pressures, Combustion and Flame, pp. 918-931.
- [19] Suslov, D., Woschnak, A., Greuel, D., Oschwald, M. Measurement techniques for investigation of heat transfer processes at European Research and Technology Test Facility, Institute of Space Propulsion, Germany Aerospace Center (DLR), Germany.
- [20] Michels, H. J., Munday, G., Ubbelohde, A. R. (1970). Detonation limits in mixtures of oxygen and homologous hydrocarbons, Proceedings of Royal Society of London, pp. 461-477.
- [21] Borisov, A. A., Kozenko, V. P., Kogarko, S. M. (1967). Detonation limits of methane-oxygen mixtures diluted with argon or helium, Combustion, Explosion and Shock Waves, pp.243-245.
- [22] Sochet, I., Aminallah, M., Brossard, J. (1997). Detonability of fuel/oxygen and fuel/air mixtures, Shock Waves, pp.163-174.

KAMIL SOB CZAK

## USE OF CALORIMETER METHOD FOR HEAT FLUX MEASUREMENT IN ROTATING DETONATION WAVE ENGINE RESEARCH

### *Abstract*

*The work will be focused on heat transfer to the combustion chamber wall of continuous detonation wave engine. Like in conventional rocket engines, heat flux is a design key factor.*

*Implementation of semi-empirical model of heat transfer (calculation of heat transfer coefficient) into REFLOPS and collected experimental data will give a basis for comparison and verification. These results will be important for further development of numerical codes.*

*Keywords: heat flux, rotating detonation engine, model of heat transfer.*