

KOSMA Zbigniew<sup>1</sup>  
KALBARCZYK Rafał<sup>2</sup>  
PIECHNIK Bartosz<sup>3</sup>  
RÓŻYCKI Andrzej<sup>4</sup>

### **PREPROCESSING SYMULACJI NUMERYCZNEJ PROCESÓW SPALANIA W POJEDYNCZEJ KOMORZE SILNIKA O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM**

*Praca przedstawia zagadnienia związane z preprocessingiem procesów spalania w silniku o zapłonie samoczynnym. Jest to pierwszy etap prac związanych z analizą numeryczną silnika diesla zasilanego dwupaliwowo. Prezentowany jest sposób realizacji preprocessingu. Do generowania siatek zostało użyte oprogramowanie firmy Ansys. Nakreślono sposób generowania siatek dynamicznych dla zmiennej geometrii.*

### **PREPROCESSING OF NUMERICAL SIMULATION OF COMBUSTION PROCESSES IN SINGLE CHAMBER OF SELF-IGNITING DIESEL ENGINE**

*The paper presents issues related to preprocessing combustion engine ignition. This is the first stage of work on the numerical analysis of the bi-fuel powered diesel engine. Presented method is an implementation of preprocessing. Grids were generated with Ansys software. It presents how to generate dynamic meshes for variable geometry.*

#### **1. WSTĘP**

Na świecie istnieje bardzo duże zapotrzebowanie na ropę naftową. Przez ostatnie 30 lat zużycie tego surowca drastycznie się zwiększyło. Istnieje wiele branż, dla których ropa jest niezbędna, jednak jej zasoby są ograniczone. Analiza światowych zasobów surowców energetycznych wskazuje, że udokumentowane rezerwy ropy naftowej wystarczą światu na pokrycie potrzeb przy obecnym zużyciu na około 40 lat.

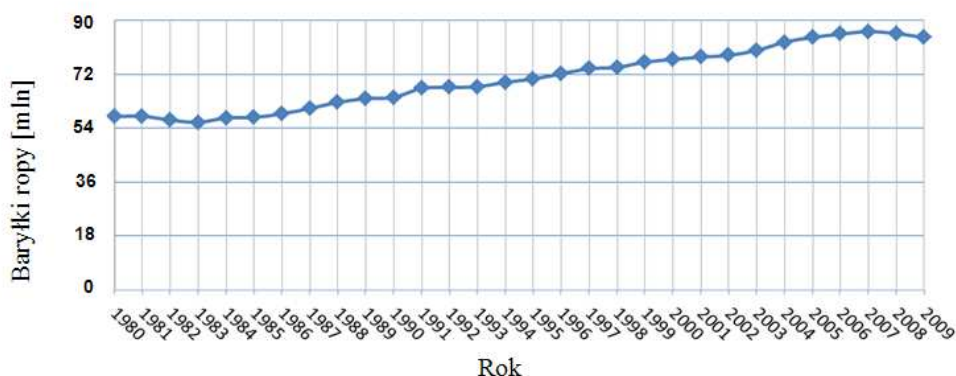
---

<sup>1</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom, ul. Krasickiego 54.  
Tel: + 48 48 361-71-20, 361-71-29, Fax: + 48 48 361-71-32, E-mail: zbigniew.kosma@pr.radom.pl

<sup>2</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom, ul. Krasickiego 54.  
Tel: + 48 48 361-71-23, 361-71-29, Fax: + 48 48 361-71-32, E-mail: rafalk.@ghnet.pl

<sup>3</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom, ul. Krasickiego 54.  
Tel: + 48 48 361-71-23, 361-71-29, Fax: + 48 48 361-71-32, E-mail: bartosz\_piechnik@wp.pl

<sup>4</sup> Politechnika Radomska, Wydział Mechaniczny, 26-600 Radom, ul. Chrobrego 45.  
Tel: + 48 48 361-76-42, 361-76-62, Fax: + 48 48 361-76-44, E-mail: andrzej.rozycki@pr.radom.pl



Rys. 1. Światowa konsumpcja ropy naftowej w milionach baryłek na dzień<sup>5</sup>

Na przestrzeni ostatnich trzech dekad zapotrzebowanie na ropę naftową znacznie wzrosło o ok. 60% (rys. 1). Jednym ze sposobów zmniejszenia zużycia tego surowca jest coraz powszechniejsze stosowanie paliw alternatywnych w konwencjonalnych silnikach. Przykładem takiego rozwiązania jest np. zasilanie silników o zapłonie iskrowym gazem LPG (*Liquefied Petroleum Gas*), bądź też silników o zapłonie samoczynnym gazem CNG (*Compressed Natural Gas*). Przemysł motoryzacyjny jest obecnie jednym z największych odbiorców ropy naftowej i jej pochodnych, dlatego ważne jest, aby możliwie w jak najkrótszym czasie stworzyć, bądź udoskonalić nowe technologie zmniejszające zużycie konwencjonalnych paliw.

## 2. SILNIK O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM ZASILANY DWUPALIWOWO

Zasilanie silnika o zapłonie iskrowym gazem LPG nie sprawia większych problemów, ponieważ spalanie inicjowane jest w tym przypadku za pomocą iskry elektrycznej.

W silnikach diesla temperatura samozapłonu oleju napędowego wynosi ok. 270°C. Spalanie w takim silniku następuje na skutek samozapłonu mieszanki paliwowej w cylindrze w temperaturze 200-300°C. Jest ono wywołane na skutek narastającego ciśnienia podczas suwu sprężania. Temperatura samozapłonu CNG jest dużo wyższa i wynosi ok. 630°C. Skonstruowanie silnika, który byłby w stanie uzyskać ciśnienie niezbędne do zapoczątkowania procesu spalania samego gazu naturalnego jest bardzo trudne. Rozwiązaniem tego problemu jest zasilanie dwupaliwowe. Polega ona na dostarczeniu do komory spalania niewielkiej dawki pilotującej w postaci oleju napędowego, która pod wpływem sprężania w cylindrze ulega zapłonowi, a następnie wtrąsnięciu właściwego paliwa, jakim jest CNG. Taka modyfikacja rozwiązuje problem wywołania w komorze reakcji spalania gazu naturalnego

CNG to naturalny gaz ziemny w postaci sprężonej do ciśnienia 20 - 25 MPa. Jest on alternatywnym paliwem składającym się w głównej mierze z czystego metanu. Mała zawartość węgla sprawia, że spaliny wydzielające się podczas procesu spalania

<sup>5</sup> Źródło danych: EIA Independent Statistics & Analysis, U.S. Energy Information Administration

charakteryzują się niższą zawartością zanieczyszczeń w stosunku do spalin będących produktem spalania oleju napędowego jednak najważniejszą zaletą stosowania zasilania dwupaliwowego jest zmniejszenie zużycia ropy naftowej.

Silnik o zapłonie samoczynnym zasilany dwupaliwowo posiada także przewagę nad silnikiem o zapłonie iskrowym zasilanym samym gazem CNG gdyż posiada:

- większą sprawność ogólną,
- większy moment obrotowy,
- większą odporność na spalanie stukowe,
- mniejszą hałaśliwość pracy.

Mimo tych wszystkich zalet silnik zasilany dwupaliwowo posiada pewne wady w stosunku do silnika bazowego (zasilanego samym olejem napędowym), a mianowicie mniejszą moc oraz skłonność do spalania stukowego. Cechą charakterystyczną tego typu spalania są silne pulsacje ciśnienia w cylindrze, pojawiające się w suwie pracy.

### 3. PREPROCESSING SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Właściwie przeprowadzona symulacja numeryczna składa się z trzech etapów. W pierwszej fazie następuje zdefiniowanie geometrii układu oraz wygenerowanie siatki numerycznej. Proces ten nosi nazwę preprocessingu. Kolejna faza symulacji, na którą składa się zdefiniowanie warunków brzegowych i początkowych oraz przeprowadzenie obliczeń nazywana jest processingiem. Po przeprowadzeniu obliczeń należy przejść do postprocessingu, czyli graficznej lub liczbowej prezentacji wyników.

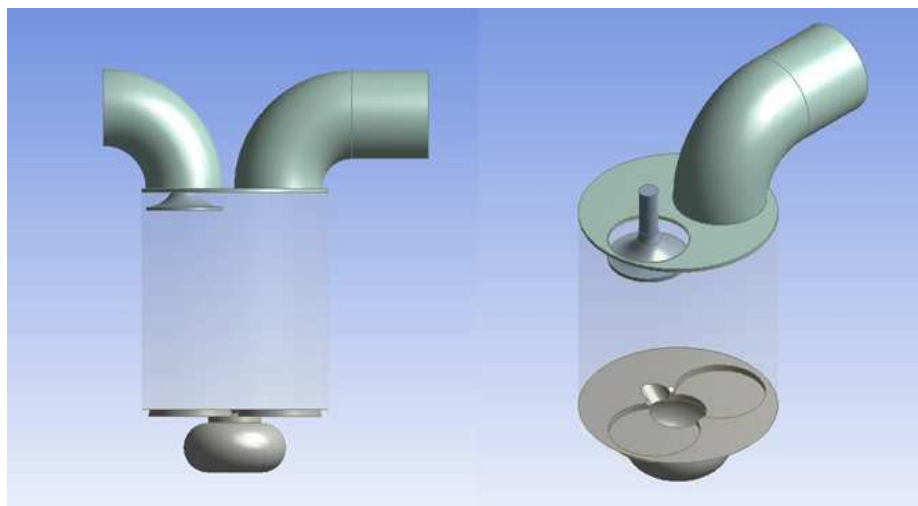
Symulacja procesów spalania w silniku o zapłonie samoczynnym jest tylko jednym z etapów prac związanych z przeprowadzeniem w przyszłości analizy numerycznej zjawisk zachodzących w pojedynczej komorze spalania silnika zasilanego dwupaliwowo. Wykonanie tej analizy pomoże rozwiązać problemy występujące podczas pracy takiego silnika. Wykorzystując analizę numeryczną można bez fizycznej ingerencji w budowę silnika przeanalizować np. różne warianty zasilania oraz dawkowania paliwa. Korzystając natomiast między innymi z rozkładów ciśnienia, temperatury czy składu chemicznego spalin będziemy w stanie wyjaśnić i przedstawić istotę problemów występujących podczas spalania, a co za tym idzie znaleźć sposób na ich rozwiązanie.

Do przeprowadzenia symulacji zostanie wykorzystane oprogramowanie ANSYS Fluent. Zaletą tego oprogramowania jest możliwość jednoczesnego modelowania różnorodnych zjawisk związanych z ruchem cieczy i gazów - przede wszystkim dotyczących reakcji spalania. ANSYS Fluent jest integralną częścią środowiska Workbench, które pozwala na przeprowadzenie kompletnej analizy. Użytkownik może przygotować geometrię, wygenerować odpowiednią siatkę numeryczną, przeprowadzić symulację i wreszcie opracować wyniki. ANSYS Fluent posiada bardzo zaawansowane narzędzie do prezentacji wyników, które w znaczący sposób zwiększają przydatność tego typu oprogramowania.

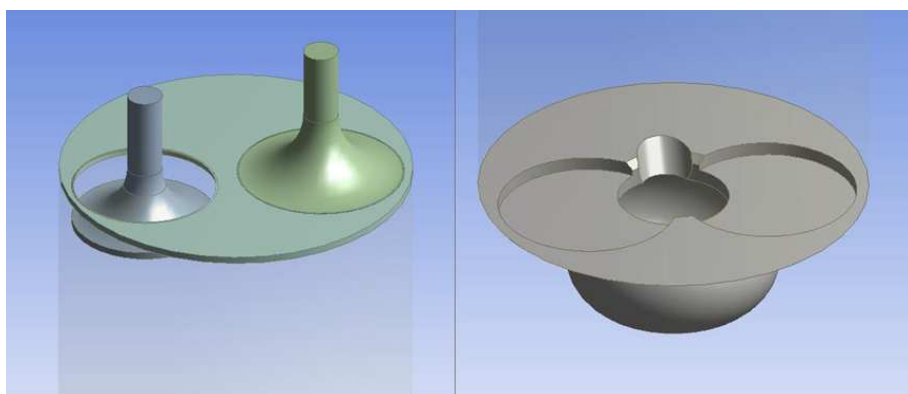
Odwzorowanie geometrii jest pierwszym etapem prac związanych z tego typu analizami. Oprogramowanie ANSYS posiada własne narzędzie do tworzenia geometrii, jakim jest DesignModeler. Jest to narzędzie, które umożliwia także wczytanie kompletnej geometrii, uprzednio przygotowanej w programach typu CAD.

Do stworzenia geometrii niezbędnej do wygenerowania siatki użyto programu Autodesk Inventor. Na podstawie rysunku technicznego głowicy silnika został odwzorowany trójwymiarowy model pojedynczej komory spalania wraz z zaworami i kanałami

dolotowymi. Geometria została zaczerpnięta z silnika ADCR firmy Andoria. Na rys. 2 przedstawiono model geometryczny komory spalania w DMP, czyli w skrajnym dolnym położeniu tłoka w cylindrze. W tej pozycji przestrzeń robocza komory silnika ma największą objętość.



Rys. 2. Model geometryczny pojedynczej komory spalania wraz z zaworami i kanałami dolotowymi



Rys. 3. Model geometryczny elementów komory spalania

Model geometryczny na rys. 2 przedstawia część silnika, w której zachodzą procesy spalania. Jest to najważniejszy element w całym silniku w perspektywie przeprowadzenia analizy numerycznej. Wszystkie badane podczas symulacji zjawiska będą zachodzić w tym obszarze. Prawidłowe odtworzenie geometrii ma wpływ na bezbłędne odwzorowanie przepływów występujących w komorze.

Bardzo ważnym zagadnieniem preprocessingu występującym podczas przeprowadzania analizy numerycznej przepływów płynów jest zadanie wygenerowania odpowiedniej siatki obliczeniowej.

Istnieją różne rodzaje siatek numerycznych, które stosuje się w zależności od geometrii obszarów wykorzystywanych na etapie symulacji numerycznych.

Siatka strukturalna składa się z rodzin linii o tym samym kierunku - przy założeniu, że linie z danej rodziny nie przecinają się wzajemnie. Lokalizacja punktu siatki (węzła obliczeniowego) może być podawana za pomocą dwóch indeksów (w płaszczyźnie) lub trzech indeksów (w przestrzeni). Siatka strukturalna może być nierównomierna lub zagęszczana przy brzegach, jej zastosowania są jednak dość ograniczone, szczególnie w zagadnieniach o bardzo złożonej geometrii. Wykorzystanie siatek strukturalnych napotyka bowiem na trudności przy zwiększaniu koncentracji węzłów obliczeniowych w miejscach o dużych gradientach wielkości hydrodynamicznych.

Siatka niestukturalna umożliwia częściową eliminację wspomnianych trudności i może być używana do obszarów o bardzo złożonej geometrii. Kształt elementu siatki może być dowolny, ale najczęściej są to trójkąty i czworokąty (w dwóch wymiarach) lub graniastopy o podstawie trójkątnej i czworokątnej (w trzech wymiarach).

Siatki blokowo-strukturalne są ciekawą alternatywą. Podczas generowania siatki obszar obliczeniowy dzielony jest na kilka bloków, wewnątrz których tworzone są lokalnie siatki strukturalne. Takie podejście zapewnia większą elastyczność w przypadkach, gdy w analizowanym zagadnieniu występują obszary o dużych gradientach wielkości hydrodynamicznych. Stosowanie siatek blokowo-strukturalnych jest korzystne w połączeniu z równoległością obliczeń, co w sytuacji rozwoju maszyn z procesorami wielordzeniowymi stanowi interesujące rozwiązanie kwestii szybkości obliczeń.

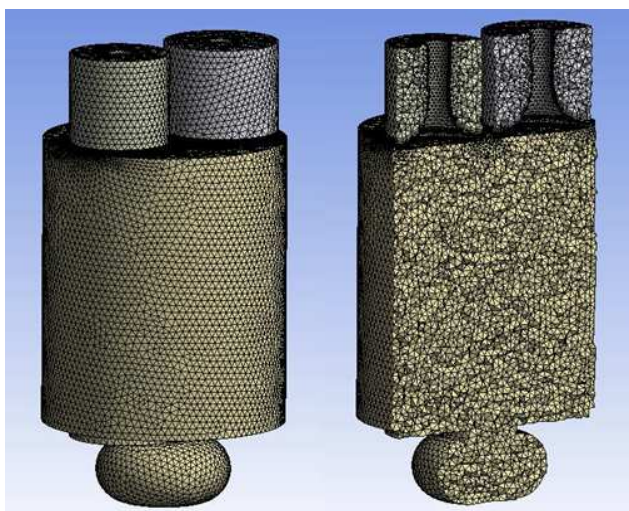
Siatki adaptacyjne oferują możliwość dokonywania dynamicznego zagęszczania lub rozrzedzania siatki numerycznej przy jednoczesnym zapewnianiu odpowiednich kryteriów dotyczących ich własności. W praktyce wykorzystuje się rozmaite kryteria adaptacyjne w zależności od uwzględniania zmian badanych wielkości fizycznych (gradient prędkości, ciśnienia itp.) lub zmian własności modelu geometrycznego (np. zagęszczanie siatki na brzegach obszaru).

Pakiet firmy Ansys posiada bardzo przydatne narzędzie, które oferuje możliwość generowania różnych rodzajów siatek. Jednym z nich program jest Ansys Meshing. W przypadku zmiennej geometrii należy wziąć pod uwagę fakt, że siatka będzie dynamiczna, czyli dla nowych położeń tłoków, tj. zmiennej geometrii, będzie korygowana. Rozmiar oraz typ siatki obliczeniowej ma bardzo duży wpływ na szybkość, ale co ważniejsze na dokładność i poprawność obliczeń. Dla zwiększenia dokładności aproksymacji wskazane jest także tworzenie siatek o różnym zagęszczeniu. Siatka obliczeniowa powinna zostać zagęszczona w miejscach o dużych gradientach prędkości.

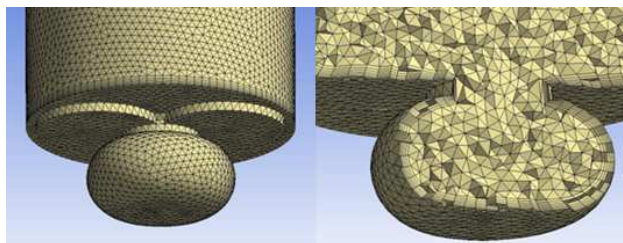
Bardzo częstym zabiegiem jest wygenerowanie kilku wariantów siatek różniących się stopniem zagęszczenia oraz liczbą elementów i zweryfikowanie następnie wyników obliczeń dla wszystkich przypadków. Po przeprowadzeniu takiej analizy należy wybrać rozwiązanie optymalne, umożliwiające uzyskanie wyników obciążonych najmniejszymi błędami w jak najkrótszym czasie.

Na podstawie przygotowanej w poprzednim kroku geometrii komory spalania (rys. 2) została wygenerowana siatka obliczeniowa składająca się z 1.8 mln. elementów (rys. 4 ÷ 5). Jest to kolejny etap preprocessingu symulacji numerycznej procesów spalania w

pojedynczej komorze silnika o zapłonie samoczynnym. Do wykonania tego zadania wykorzystano program Ansys Meshing, który oferuje bardzo zaawansowane możliwości tworzenia siatek obliczeniowych. Prawidłowo wygenerowana siatka numeryczna ma bardzo duże znaczenie, ponieważ pozwala na uzyskanie satysfakcjonujących wyników. Przedstawiona na rys. 4 siatka obliczeniowa składa się głównie z elementów czworobocznych.

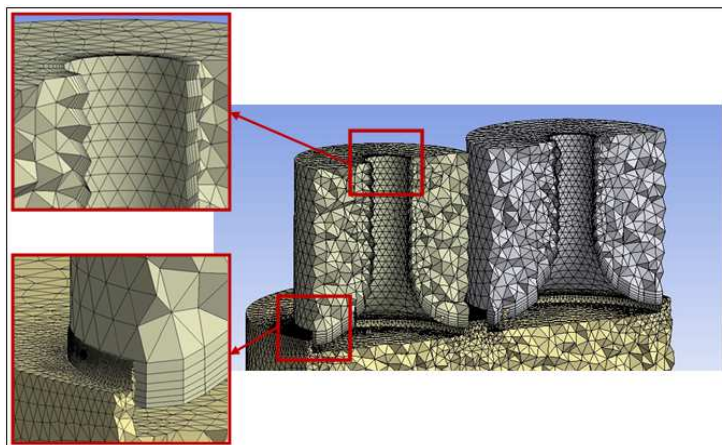


Rys. 4. Siatka numeryczna wygenerowana w Ansys Meshing



Rys. 5. Siatka numeryczna wygenerowana w Ansys Meshing – zbliżenie na komorę wstępną

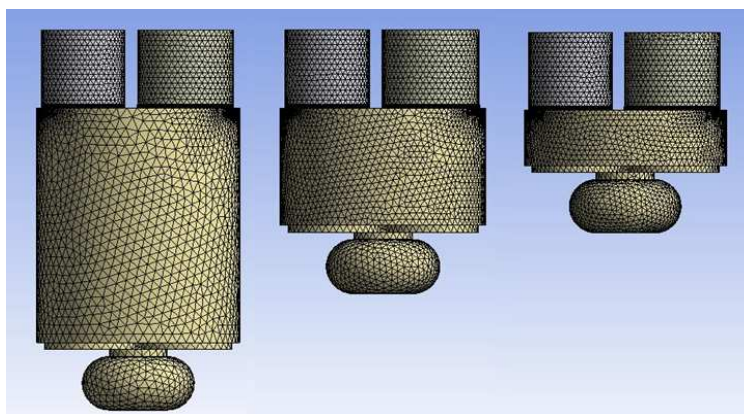
W przypadku preprocessingu symulacji numerycznej procesów w komorze spalania należy zastanowić się, w których obszarach będą zachodziły najistotniejsze zjawiska w czasie pracy silnika. Na rys. 6 pokazany jest sposób, w jaki została zagęszczona siatka obliczeniowa w kanałach dolotowych. Zagęszczenie siatki przy brzegach zaworów pozwala na uzyskanie dokładniejszych rozkładów wielkości hydrodynamicznych, np. prędkości, czy ciśnienia. Dodatkowo siatki należy zagęścić wszędzie tam, gdzie występują duże gradienty prędkości w celu zwiększenia dokładności obliczeń.



Rys. 6. Sposób zagęszczenia siatki obliczeniowej w kanałach dolotowych

#### 4. PODSUMOWANIE

Przejsie przez poszczególne fazy preprocessingu jest pierwszym etapem, który w przyszłości pozwoli na przeprowadzenie symulacji numerycznej silnika diesla zasilanego dwupaliwowo. Do tego celu zostanie wykorzystany solver pakietu Fluent. W następnym etapie wykonywanego zadania bardzo istotne będzie poprawne określenie wszystkich wczytywanych danych dla jak najwierniejszego odwzorowania warunków panujących w komorze spalania. Sumaryczny czas uzyskiwania wyników będzie zależał nie tylko od jakości wygenerowanej siatki o zmieniających się rozmiarach oczek (rys. 7), przyjętego modelu fizycznego procesów spalania ale także od parametrów komputera, na którym będą przeprowadzane symulacje numeryczne.



Rys. 7. Przykładowe siatki obliczeniowe wygenerowane dla różnych położeń tłoka



Przeprowadzenie symulacji numerycznej pozwala niejednokrotnie na zastąpienie kosztownych i czasochłonnych badań eksperymentalnych obiektów mechanicznych, niekiedy niemożliwych do przeprowadzenia dla specyficznych warunków pracy tych urządzeń, np. wyznaczanie rozkładów parametrów hydrodynamicznych w miejscach niedostępnych. Symulacje numeryczne pozwalają także dodatkowo na zweryfikowanie założeń konstrukcyjnych pracy takich urządzeń oraz skuteczne planowanie warunków ich pracy. W rozważanym przypadku, po przeprowadzeniu kompletnej analizy numerycznej i porównaniu jej wyników z rezultatami badań eksperymentalnych można będzie zdiagnozować problemy występujące podczas pracy silnika o zapłonie samoczynnym zasilanego dwupaliwowo i zaproponować ewentualne rozwiązania konstrukcyjne. Jest przy tym istotne, że pomiary laboratoryjne są dokonywane wyłącznie w wybranych punktach dyskretnych, natomiast przeprowadzenie symulacji numerycznych pozwala na uzyskanie wyników w całej objętości komory spalania.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Różycki A.: *Analiza drgań głowicy silnika wysokoprężnego zasilanego dwupaliwowo*, Journal of KONES Internal Combustion Engines, Warszawa 2006.
- [2] Różycki A.: *Granica spalania stukowego w dwupaliwowym silniku o zapłonie samoczynnym*, Czasopismo techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej 2008.
- [3] Kowalewicz A.: *Adaptacja silnika wysokoprężnego do zasilania gazem naturalnym*, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
- [4] Varol Y., Oztop H.F., Firat M., Koca A.: *CFD modeling of heat transfer and fluid flow inside a pent-roof type combustion chamber using dynamic model*. International Communications in Heat and Mass Transfer 2010.
- [5] Yusaf T.F., Buttsworth D.R., Saleh K.H., Yousif B.F.: *CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with aid of artificial neural network*. Applied Energy 2010.
- [6] Wajand J.A.: *Silniki o zapłonie samoczynnym*. WNT Warszawa 1980
- [7] Gosman A.D.: *State of the Art of Multi-Dimensional Modeling of Engine Reacting Flows*. Oil & Gas Science and Technology 1999.
- [8] Dokumentacja programu ANSYS Fluent.