

Mgr inż. Daniel STĘPNIAK
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
Ośrodek Energetyki Ciepłej – Zakład Turbin

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.298

METODYKA NUMERYCZNEGO ROZWIĄZYWANIA PRZEPIYU W SILNIKACH SPALINOWYCH

Streszczenie: W niniejszym artykule przedstawiono metody numerycznego rozwiązywania przepływu w komorze spalania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym zamontowanego w agregacie ZGT-60/D/MA/PE [1]. W sposób bardzo szczegółowy przedstawiono podział obszaru komory spalania ww. geometrii silnika wraz z opisem metodyki budowy siatki obliczeniowej oraz zaprezentowano uzyskane wyniki.

Praca ma na celu pokazanie sposobu wykorzystania dostępnych narzędzi numerycznych do modelowania zagadnień związanych z obliczeniami procesów zachodzących w cylindrach silników spalinowych o zapłonie iskrowym. Wyniki z obliczeń numerycznych stanowią bazę porównawczą w stosunku do wyników uzyskanych na drodze badań eksperymentalnych.

NUMERICAL SOLUTION OF FLUID FLOW ANALYSIS IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A SPARK IGNITION ENGINE

Abstract: The paper presents methods for numerical solution of fluid flow analysis in the combustion chamber of a spark ignition internal combustion engine installed in the ZGT-60/D/MA/PE [1] electric generation unit. Detailed separation of domains including combustion chamber was presented and elaborated. The article includes also description of the methodology of building the computational grid and presents the results of performed calculations.

The presented work demonstrates how to use ICE tool in Ansys Workbench that is attend to obtaining appropriate results of calculation of the processes taking place in the spark ignition internal combustion engine.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe o zapłonie iskrowym, przepływy turbulentne w komorze spalania, indykowanie silników

Keywords: internal combustion engines, turbulent flows, engine pressure indicating

1. WPROWADZENIE

Kluczową kwestią w obliczeniach numerycznych jest jak najwierniejsze zamodelowanie rzeczywistych wymiarów badanej geometrii. W przypadku silników spalinowych szczególną uwagę należy zwrócić na wielkość i kształt komory spalania, denka tłoka oraz kanałów i kształt zaworów ssących i wylotowych. Komory spalania mogą być płaskie, w kształcie półkuli lub rozgwiazdy. Korona tłoka może być z kolei płaska, wypukła bądź wklęsła. W przypadku sposobu osadzenia zaworów w gniazdach zaworowych mogą być one ustawione równoległe do osi cylindra bądź pod kątem do osi cylindra i prostopadłe do powierzchni spalania komory. Wykazano, że wydajność objętościowa i ilość powietrza, która trafia do cylindra, jest wprost proporcjonalna do stosunku powierzchni zaworu wlotowego oraz powierzchni przekroju poprzecznego walca o średnicy równej średnicy gniazd zaworowych. Dlatego też szczególnie istotne jest, aby zawory wlotowe charakteryzowały się możliwie jak największą średnicą w stosunku do średnicy otworu gniazda zaworowego. Płaski kształt górnej przestrzeni komory spalania ogranicza powierzchnię dostępną dla układu zaworowego. Z kolei dla górnej części komory spalania w kształcie półkuli lub rozgwiazdy zastosowane rozwiązanie stwarza większe możliwości w zakresie otwierania i przemykania kanałów dolotowych oraz wylotowych przez odpowiednie zawory. Zwiększa się tym samym ich wydajność pracy. Oznacza to jednak, że komora spalania zwiększa swoją objętość oraz powierzchnię wymiany ciepła. Co za tym idzie, wydłuża się dystans, który ma do pokonania płomień, zwiększając tym samym szansę niepełnego spalania cząstek zawartych w paliwie.

Geometria komory spalania, zarówno jej dolnej, jak i górnej części, determinuje także wartość stopnia sprężania, który jest zdefiniowany jako stosunek objętości cylindra przy położeniu tłoka w dolnym jego martwym punkcie (DMP) do objętości cylindra przy położeniu tłoka w górnym martwym punkcie (GMP). Parametr ten jest kluczowym czynnikiem w procesie kontrolowania wydajności spalania i ograniczania emisji zanieczyszczeń. Wysoki stopień sprężania przyczynia się do zwiększania wydajności spalania, niemniej jednak jest przyczyną wzrostu temperatury, co z kolei powoduje zwiększoną emisję NOx. Dla geometrii o zwiększonej objętości wartość tego parametru maleje. Równocześnie przyrost powierzchni ścian zwiększa straty ciepła oraz niekorzystnie wpływa na sam proces spalania.

Na poprawę wydajności oraz przebiegu procesu spalania duży wpływ ma również zmiana kształtu tłoka, a więc dolnej przestrzeni komory spalania. Może ona przyjmować kształt zarówno powierzchni płaskiej, jak i wklęsłej. Zmiana geometrii powierzchni tłoka służyć ma głównie zmniejszeniu objętości wewnętrznej komory spalania przy równoczesnym zachowaniu optymalnych parametrów przepływowych. Ostateczny projekt geometrii przestrzeni roboczej silnika, a więc geometrii portów ssących/wydechowych, głowicy silnika, cylindrów, zaworów i tłoków, powinien uwzględniać wzajemne kompromisy pomiędzy sprawnością objętościową oraz spalaniem i powstawaniem zanieczyszczeń czy optymalnym stopniem sprężania.

2. GEOMETRIA SILNIKA

W omawianym przypadku kształt denka cylindra został zaplanowany i zaprojektowany w formie powierzchni wklęsłej. Korzyści płynące z wprowadzenia takiego rozwiązania zostały przedstawione w rozdziale 4. Poniżej przedstawione zostały wizualizacje geometrii

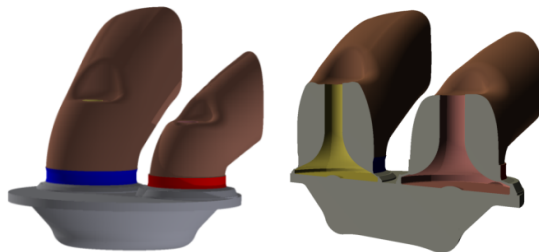
elementów silnika determinujących parametry przepływu. Uwzględniają one zarówno zestawienie całościowe układu przepływowego, w skład którego wchodzi wycinek głowicy silnika, tłok, zawory ssący i wylotowy oraz cylinder, jak również wyróżniono każde z osobna wycinek głowicy silnika, tłok silnika oraz zawory ssący i wydechowy (rys. 1).



Rys. 1. Wycinek głowicy silnika w przekroju, tłok silnika oraz zawory ssący (prawy) i wylotowy (lewy) – rzuty od przodu oraz izometryczny

2.1. Geometria obszaru obliczeniowego

W oparciu o dokumentację techniczną silnika zamodelowano, z wykorzystaniem programu graficznego Autodesk Inventor, obszar przepływu czynnika roboczego składającego się z: kanałów dolotowych/wylotowych, górnej części tłoka, ścianek cylindra oraz dolnej części głowicy silnika. Poniżej przedstawione zostały wizualizacje kształtu poddawanego analizie obszaru roboczego (rys. 2). Zamieszczone ryciny obrazują w sposób dokładny rodzaj zastosowanych w konkretnym modelu silnika rozwiązań technologicznych dotyczących sposobu usadowienia zaworów względem osi cylindra oraz kształtu cylindra.



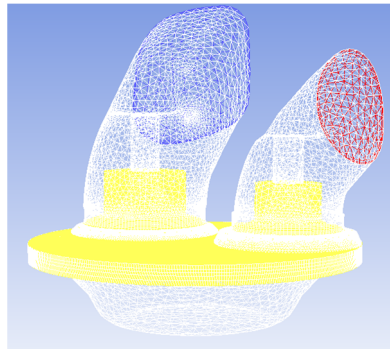
Rys. 2. Przestrzeń robocza rozpatrywana w trakcie obliczeń numerycznych – rzut izometryczny, widok pod kątem 45°

Dla wizualizacji oznaczonej jako rys. 2 przestrzenie w kształcie zaworów ssącego oraz wydechowego, wyróżniające się na tle obszaru obliczeniowego, stanowią jedynie objętości, w których powinny znajdować się trzonki oraz stopy zaworów. Nie obrazują z kolei samych wspomnianych elementów.

3. SIATKA MODELU OBLICZENIOWEGO

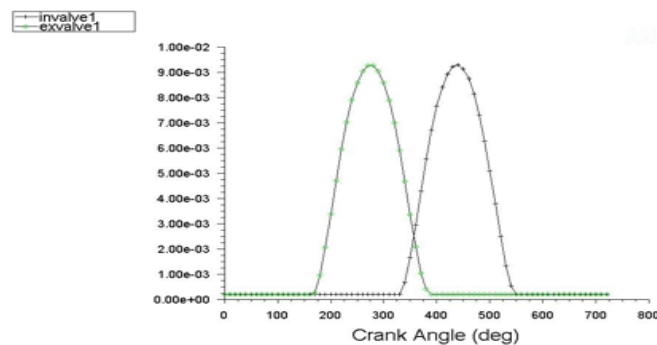
Podział obszaru roboczego został przeprowadzony w taki sposób, aby umożliwić jak najdogodniejsze i optymalne wygenerowanie siatki obliczeniowej. Narzędziem, którym

posłużono się do jej wykonania, był jeden z modułów zaimplementowanych w programie Ansys WORKBENCH [2]. Obszar analizy numerycznej został poddany podziałowi na sekcje przestrzeni przepływu w części głowicy silnika (kanały wlotowy oraz wylotowy) oraz obszar między głowicą silnika a powierzchnią górną cylindra. Dodatkowo konieczne było określenie wlotu oraz wylotu płynu z obszaru pracy, a także powierzchnia ewentualnego styku tłoka ze ścianką cylindra (rys. 3). W celu zminimalizowania błędów obliczeniowych oraz osiągnięcia zbieżności wyników przy możliwie krótkim czasie trwania obliczeń, istotne było określenie powierzchni symetrii dzielącej przestrzeń, w której dochodzi do rozplywu czynnika, na dwa równe segmenty. Dla omawianego przypadku konstrukcji o różnych kształtach kanałów głowicy silnika wskazanie takiej powierzchni symetrii okazało się niemożliwe.



Rys. 3. Wizualizacja 3D podziału obszaru obliczeniowego

W trakcie obliczeń numerycznych wykorzystano narzędzie zaprojektowane specjalnie w celu badania przepływów jednostek silnikowych, których charakterystyczną cechą jest posuwisto-zwrotny ruch elementów takich jak zawory oraz tłok – IC Engine. W celu lepszego zobrazowania zmian zachodzących w każdym z cykli pracy jednostki silnikowej, wykorzystano model obliczeniowy umożliwiający postępującą wraz ze zmianą kąta położenia wału zmianę ilości oraz kształtu poszczególnych oczek siatki. Sposób deformacji geometrii siatki dla obszarów opisujących ruch zaworów został wymuszony zgodnie z rozkładem punktów leżących na krzywej przedstawionej poniżej (rys. 4).

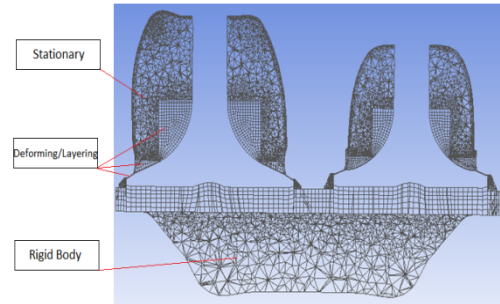


Rys. 4. Krzywe otwarcia zaworów ssącego oraz wylotowego

Parametry charakterystyczne warunkujące indywidualny sposób pracy silnika, związane z budową układu korbowego, zostały uwzględnione również na etapie obliczeń

numerycznych. Wynosiły one: promień wału korbowego – 45 [mm], długość korbowodu – 144,3 [mm], odsunięcie od mocowania korbowodu od osi tłoka – 0 [mm].

Metodyka wyznaczania sposobu zmiany kształtu siatki ściśle zależna jest od kształtu analizowanego obszaru oraz przewidywanego sposobu rozptywu czynnika wokół powierzchni elementów silnika.



Rys. 5. Podział siatki przekroju obszaru obliczeniowego ze względu na sposób deformacji

Z tego też tytułu w miejscach, w których było to możliwe, liczba oraz rozmieszczenie węzłów między oczkami siatki pozostawała bez zmian (rys. 5 – Stationary). Podobnie dla obszaru cylindra liczba oczek oraz położenie węzłów między nimi pozostawały stałe. Niemniej jednak zmianie ulegało położenie przestrzeni względem pozostałej części siatki (rys. 5 – Rigid Body). W pozostałych domenach obszaru obliczeniowego zwielokrotnienie liczby oczek postępowało na drodze powstawania oraz późniejszego eliminowania kolejnych warstw oczek siatki, równoległych do powierzchni domeny, do której przynależały (rys. 5 – Layering).

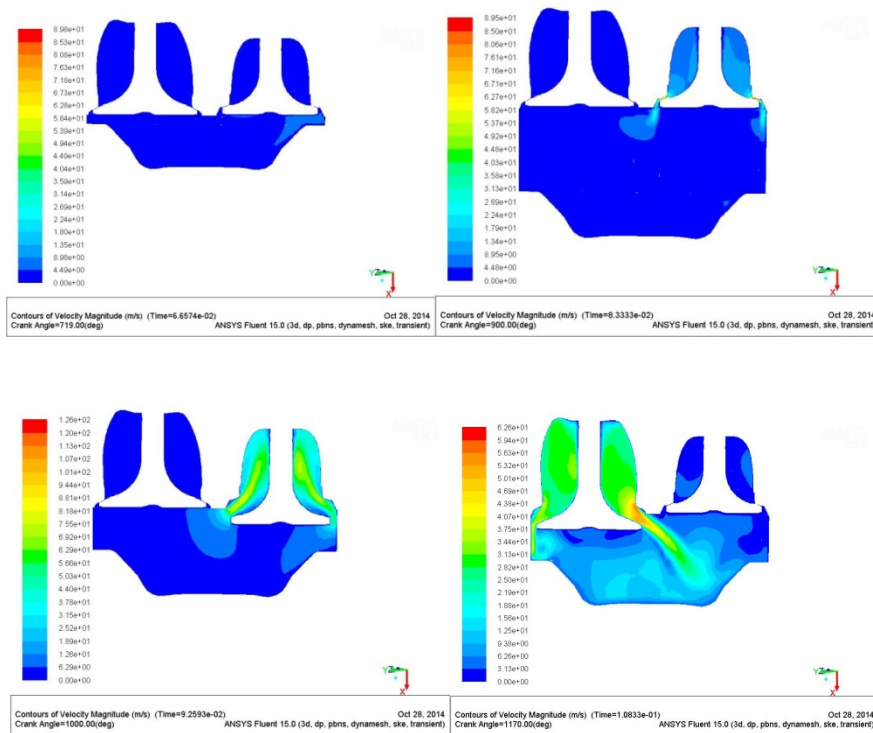
Parametry determinujące w znaczącym stopniu sposób przebiegu zmian w poszczególnych domenach obszaru obliczeniowego, odpowiednio dla różnych przypadków, ustalono na następującym poziomie: Minimum length scale: 0,0008, Maximum length scale: 0,0012, Maximum cell skewness 0,7 (dla domen ze zmienną siatką typu Remeshing) oraz Split Factor: 0,4, Collapse Factor 0,4 (dla domen ze zmienną siatką typu Layering).

4. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Do obliczeń wykorzystano program Fluent firmy ANSYS. Obliczenia przeprowadzono w modelu trójwymiarowym przy zastosowaniu dwurównaniowego modelu turbulencji k-epsilon z funkcją ścianki. Na wlocie i wylocie z kolektorów zastosowano warunki ciśnieniowe, odpowiednio: kolektor ssący – pressure inlet, kolektor wylotowy – pressure outlet, gdzie zadano ciśnienie 1 [bar] i temperaturę całkowitą 318 [K]. Na ściankach zadano stałą temperaturę równą 360 [K]. Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy zastosowaniu ruchomych siatek adaptujących się w zależności od położenia względem siebie zaworów oraz tłoka w cylindrze. Z uwagi na niestacjonarny charakter zjawiska krok czasowy dobrano tak, aby odpowiadał 0,25 [-] stopnia obrotu wału korbowego.

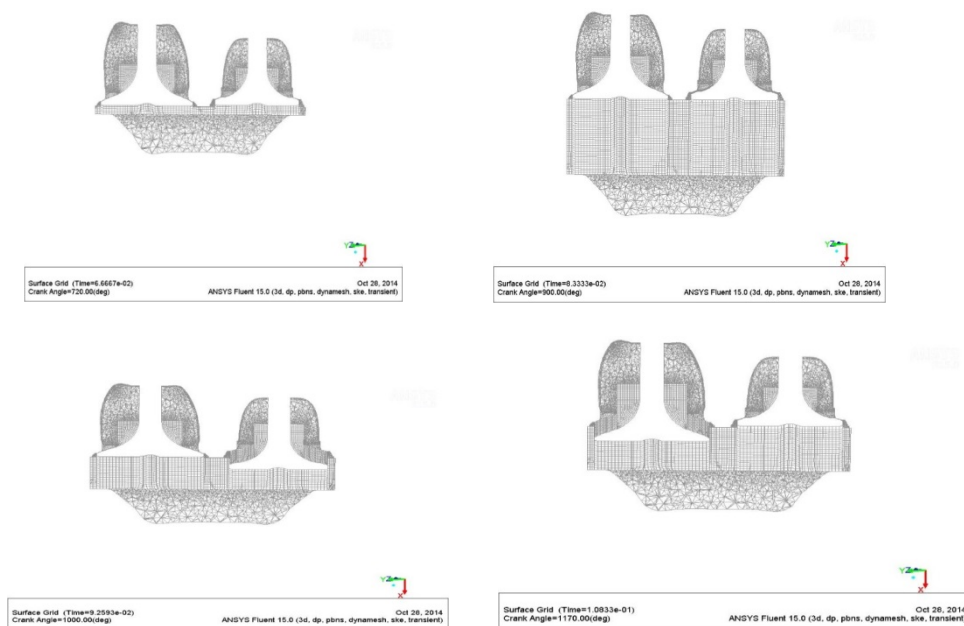
Poniżej zaprezentowano uzyskane wyniki modelu bez spalania, gdzie czynnikiem roboczym było powietrze. Symulacja miała na celu sprawdzenie poprawności wygenerowanej geometrii i siatki oraz sprawdzenie poprawności przyjętego modelu numerycznego do obliczeń spalania w komorach spalania silników spalinowych z zapłonem iskrowym. Na rysunku 6

zaprezentowano rozkłady zmiany prędkości przepływu czynnika w obrębie gniazd zaworowych w zależności od położenia tłoka.



Rys. 6. Wizualizacja zmian prędkości przepływu przy kątach 719°, 900°, 1000° oraz 1170°

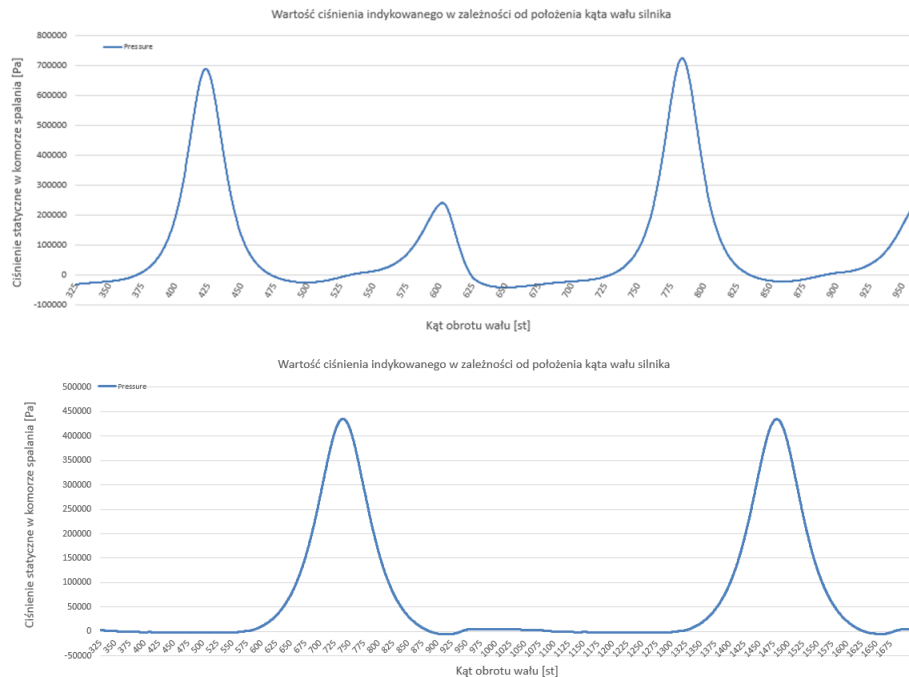
Przykładowe ryciny obrazujące stopień ewoluowania zmian geometrii roboczej oraz liczby oczek i węzłów siatki postępującej wraz ze zmianą kąta położenia wału silnika zostały przedstawione na kolejnych rysunkach.



Rys. 7. Wizualizacja zmian siatki obliczeniowej

Zamieszczone przekroje ukazują przykładowe zmiany w geometrii silnika w poszczególnych jego fazach pracy. Kolejno: stan początkowy siatki obliczeniowej w początkowej fazie obliczeń, opuszczanie się denka tłoka w kierunku DMP, powrót tłoka w kierunku GMP – zawór wylotowy w skrajnym położeniu (całkowicie otwarty), powrót tłoka w kierunku DMP – zawór wlotowy w skrajnym położeniu (całkowicie otwarty).

Otrzymane wyniki dla obliczeń trójwymiarowych porównano z obliczeniami 2D wykonanymi wcześniej dla tej samej geometrii.



Rys. 8. Zmiany ciśnienia w obszarze komory spalania w zależności od położenia kąta wału – wynik dla obliczeń 2D (wykres górny) oraz dla obliczeń 3D (wykres dolny)

Model 3D uwzględniający pełną geometrię w obrębie gniazd zaworowych eliminuje pojawiający się w obliczeniach 2D błąd wzrostu ciśnienia indykowanego w fazie oczyszczania komory spalania (rys. 8).

5. WNIOSKI

Analiza przepływu zimnego powietrza nie uwzględnia spalania paliwa, aczkolwiek bierze pod uwagę wpływy wtrysku paliwa na procesy mieszania oraz przepływu w silniku. Celem nadrzędnym przeprowadzenia tego rodzaju obliczeń numerycznych, niełączących efektów reakcji chemicznych, jest uchwycenie wpływu oddziaływania ruchu elementów silnika na proces tworzenia bądź przepływu mieszanki. Ma to szczególne znaczenie dla prawidłowego określenia parametru ciśnienia indykowanego.

Przeprowadzone obliczenia numeryczne stanowią fragment zagadnienia procesów spalania oraz prawidłowego procesu mieszania i przepływu w komorze spalania silnika. Przedstawiona metodyka obliczeniowa, wykorzystywana do symulacji pracy silnika spalinowego o zapłonie

iskrowym, pozwala na szczegółową analizę uzyskania rezultatów w dowolnym obszarze zamodelowanego elementu w porównaniu do wyników eksperymentalnych, które niejednokrotnie otrzymywane są w jednym punkcie lub są uśredniane. Niemniej jednak, wszystkie wyniki numeryczne powinny być poddane szczegółowej analizie i porównane z wynikami otrzymanymi na drodze eksperymentalnej na rzeczywistym obiekcie.

LITERATURA

- [1] Skarpetowski B., Stępnia D., Koronowicz J., Lampart P., Jędrzejewski Ł.: *Opracowanie projektu stacji syngazowej stworzonej na potrzeby zasilania silnika o zapłonie iskrowym*, Gdańsk, 2012.
- [2] Ansys WORKBENCH, fluent – 2012, www.ansys.com.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported in part by PL-Grid Infrastructure.