

Konrad Pietrykowski¹, Mirosław Wendeker¹, Łukasz Grabowski¹

MODELOWANIE 3D PROCESU NAPEŁNIANIA W SILNIKU O ZI

Streszczenie. W Politechnice Lubelskiej powadzone są prace mające na celu opracowanie systemu zasilania wodorem silnika o ZI. W celu poznania zjawisk zachodzących podczas procesu napełniania silnika przeprowadzono badania modelowe z wykorzystaniem oprogramowania AVL Fire. W artykule przedstawiono wyniki badań modelowych ilustrujące zjawiska związane z przepływem powietrza przez kanały dolotowe silnika jak również ruch powietrza w komorze spalania.

Słowa kluczowe: modelowanie CFD, proces napełniania.

WSTĘP

W Politechnice Lubelskiej powadzone są prace mające na celu opracowanie systemu zasilania wodorem silnika o ZI. Wodór jest paliwem gazowym o specyficznych właściwościach, charakteryzuje się on m.in. małą gęstością, co sprawia, że silniki zasilane wodorem mają znacznie mniejszy współczynnik napełniania w porównaniu do silników zasilanych innymi paliwami gazowymi. Mała gęstość wodoru powoduje także konieczność stosowania długich czasów wtrysku, co jest przyczyną wydłużenia czasu tworzenia mieszanki. W celu optymalnego zaprojektowania systemu wtryskowego konieczne jest dokładne poznanie zjawisk zachodzących podczas procesu napełniania i procesu tworzenia mieszanki w badanym silniku. W niniejszym artykule przedstawiono proces budowy modelu numerycznego przestrzeni roboczej silnika oraz wyniki badań symulacyjnych procesu napełniania.

Badania modelowe przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania AVL Fire, które umożliwia analizę zagadnień związanych z przepływem płynów. AVL Fire jest specjalizowanym narzędziem do modelowania i analizy zjawisk przepływowych zachodzących w silnikach spalinowych. Program umożliwia zarówno modelowanie stanów ustalonych jak i uwzględnienie dynamiki przepływów. AVL Fire pozwala na symulację przepływu cieczy i gazów z uwzględnieniem ściśliwości, mieszania, wpływu temperatury, turbulencji, kawitacji, wymiany ciepła, spalania. Umożliwia też obliczenia procesu wtrysku i spalania paliwa ciekłego wewnątrz ruchomej siatki obliczeniowej (silniki spalinowe). Do przeprowadzenia analizy konieczne jest zbudowanie tzw. siatki numerycznej dzielącej przestrzeń przepływu na elementarne objętości skończone. CFD opiera się na metodzie objętości skończo-

¹ Katedra Termodynamiki, Mechaniki Płynów i Napędów Lotniczych, Politechnika Lubelska.

nych i polega na rozwiązywaniu układu równań różniczkowych bilansu masy, pędu i energii metodami numerycznymi. Odpowiednie przygotowanie siatki ma decydujące znaczenie przy późniejszych obliczeniach. Zbyt mała ilość elementów siatki wywołuje małą dokładność przeprowadzanych analiz. Z drugiej strony zbyt duża liczba elementów zwiększa czas potrzebny na przeprowadzenie obliczeń. Bardzo ważnym aspektem obliczeń jest właściwe dobranie kroku obliczeniowego. Wpływa on na dokładność i na stabilność obliczeń. Przy jego doborze należy uwzględnić wielkość komórek obliczeniowych oraz wartość gradientów parametrów płynu w objętości modelu [1, 2].

ZAŁOŻENIA MODELU

Modelowana jednostka napędowa jest to czterocylindrowy silnik benzynowy montowany m.in. w samochodach Opel Corsa D. Pojemność skokowa cylindrów wynosi 1398 cm³. Silnik wyposażony jest w wielopunktowy układ wtryskowy benzyny oraz bezstopniową regulację faz rozrządu, posiada on również zmienną geometrię układu dolotowego. Silnik spełnia normę emisji spalin EURO 5. Dane techniczne zostały przedstawiono w tabeli 1.

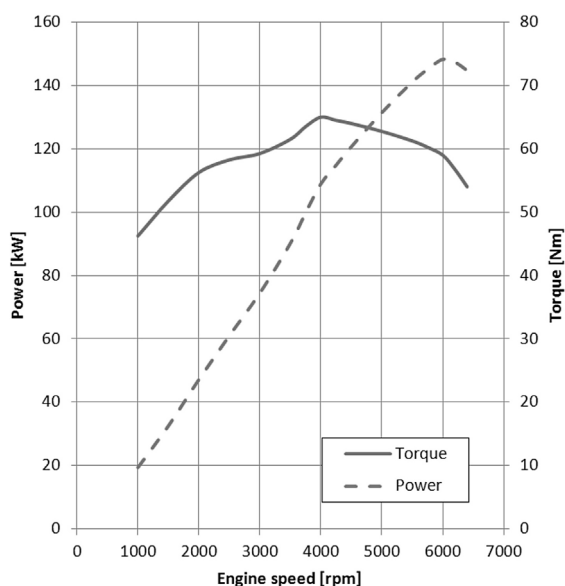
Tabela 1. Parametry silnika A14XER [4]

Silnik	1.4 ecoFLEX
Oznaczenie	A14XER
Typ	benzynowy
Liczba cylindrów	4
Pojemność, [cm ³]	1398
Moc/prędkość obrotowa, [KM]/[obr/min]	100/6000
Moment obrotowy/ prędkość obrotowa, [Nm]/[obr/min]	130/4000
Średnica cylindra, [mm]	73,4
Skok tłoka, [mm]	82,6
Stopień sprężania, [-]	10,5
Liczba zaworów	16
Układ rozrządu	bezstopniowa regulacja faz (DCVCP)
Układ dolotowy	zmienna geometria
Kontrola emisji spalin	reaktor katalityczny, liniowy EGR
Norma emisji spalin	Euro 5
Zastosowanie	Opel Corsa D

Na rysunku 2 przedstawiono charakterystykę zewnętrzną mocy oraz momentu obrotowego silnika A14XER.



Rys. 1. Widok silnika A14XER
 Źródło: <http://gmpowertrain.com> [4]



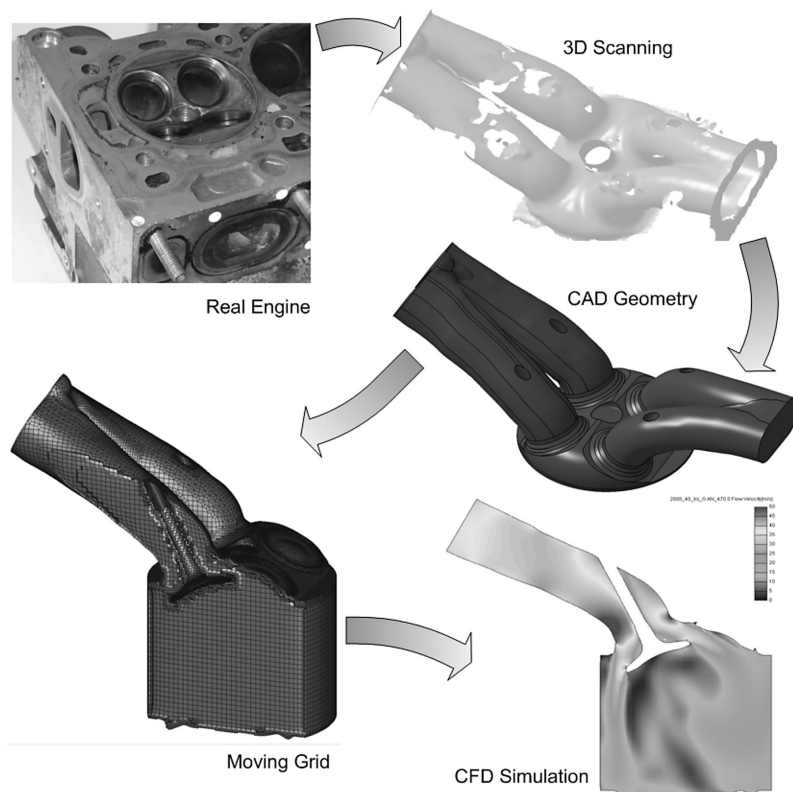
Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna silnika A14XER [4]

MODEL SILNIKA

Podczas modelowania wykorzystano geometrię cylindra, głowicy wraz z kanałem dolotowym i wylotowym oraz denko tłoka. Proces budowy modelu składał się z następujących etapów (rys. 3):

- skanowanie 3D denka tłoka i głowicy silnika oraz pomiary geometrii i wzniosu zaworów,

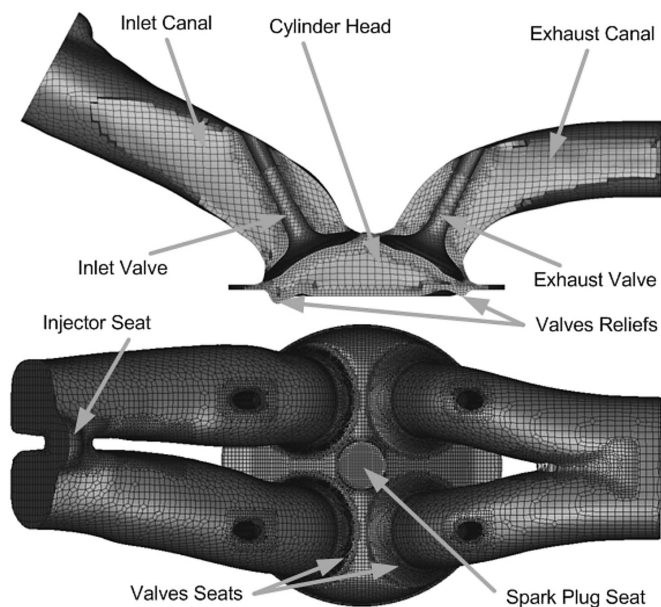
- opracowanie geometrii silnika w programie graficznym 3D (komora spalania, kanały dolotowy i wylotowy oraz zawory),
- zbudowanie objętościowej siatki obliczeniowej w module Fame Engine Plus.



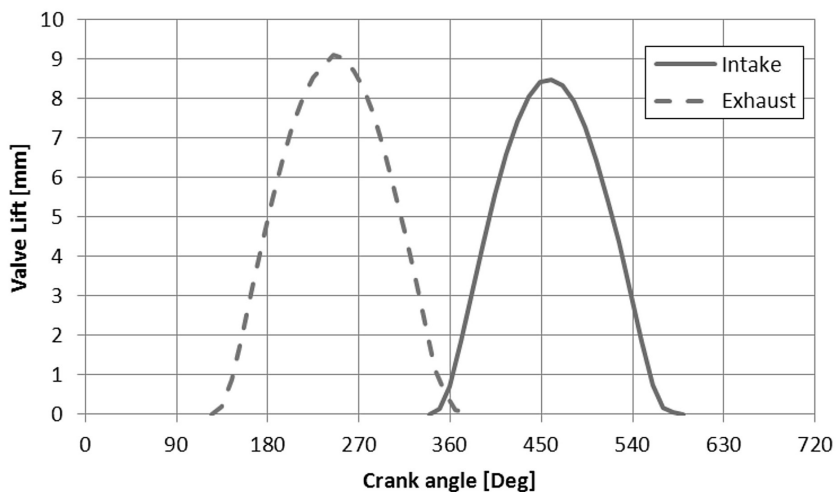
Rys. 3. Etapy budowy modelu silnika w systemie AVL FIRE

Model geometryczny zawiera: komorę spalania ograniczoną powierzchnią głowicy, cylindra oraz tłoka, kanały w głowicy (dolotowy i wylotowy) oraz zawory (dolotowy i wylotowy) (rys. 4). Na powierzchni głowicy widoczne jest wybranie w miejscu montażu świecy zapłonowej, zaś na tłoku wybrania pod zawory.

Liczba komórek siatki obliczeniowej zmienia się 146 tys. do 240 tys w zależności od położenia tłoka. W jej skład wchodzi głównie elementy typu „tetrahedral” czyli figury posiadające sześć ścianek i osiem wierzchołków. Model ma pięć ruchomych elementów: 4 zawory i tłok. Ruch tłoka został zdefiniowany automatycznie na podstawie wymiarów elementów układu korbowego wprowadzonych do programu. Charakterystykę wzniosu zaworów dołączono do modelu w postaci plików tekstowych. Przebieg wzniosu zaworów w funkcji obrotu wału korbowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Siatka obliczeniowa



Rys. 5. Charakterystyka wzniosu zaworów silnika A14XER

Opisane wyniki badań zawierają analizę przebiegu napełniania pierwszego cylindra silnika w jednym punkcie pracy. W badaniach przyjęto następujące założenia:

- Stała temperatura ścianek [2]:
 - głowicy 550 K,
 - cylindra 450 K,

- tłoka 600 K,
- kanału dolotowego 360 K,
- kanału wylotowy 580 K.
- Gęstość przepływającego gazu zależna jest od ciśnienia i temperatury.
- Przez model przepływa powietrze o następujących właściwościach:
 - gęstość w warunkach normalnych 1,18415 kg/m³,
 - lepkość dynamiczna 1,81e-05 kg/ms,
 - ciepło właściwe 1003,62 J/kg K,
 - przewodność cieplna 0,02637 W/m K,
 - ciężar molekularny 28,96 kg/kmol.
- Siła grawitacji skierowana w stronę denka tłoka.
- Model turbulencji k-zeta-f.

Symulacja została przeprowadzona przy użyciu funkcji transient (stan nieustalony), co oznacza że parametry przepływu czynnika są zmienne w czasie. Przyjęto warunki brzegowe pracy silnika dla jazdy z dużym obciążeniem. Założono więc:

- prędkość obrotową 2500 obr/min,
- ciśnienie na dolocie 0,08 MPa,
- ciśnienie na wylocie 0,1 MPa.

Aby przeanalizować proces wymiany ładunku zakres symulacji ustalono na 350 – 720 OWK. Szczegółowej analizie poddano model w zakresie od 400 do 700 °OWK. Wielkość kroku obliczeniowego założono 1 °OWK, natomiast ilość iteracji w kroku 50.

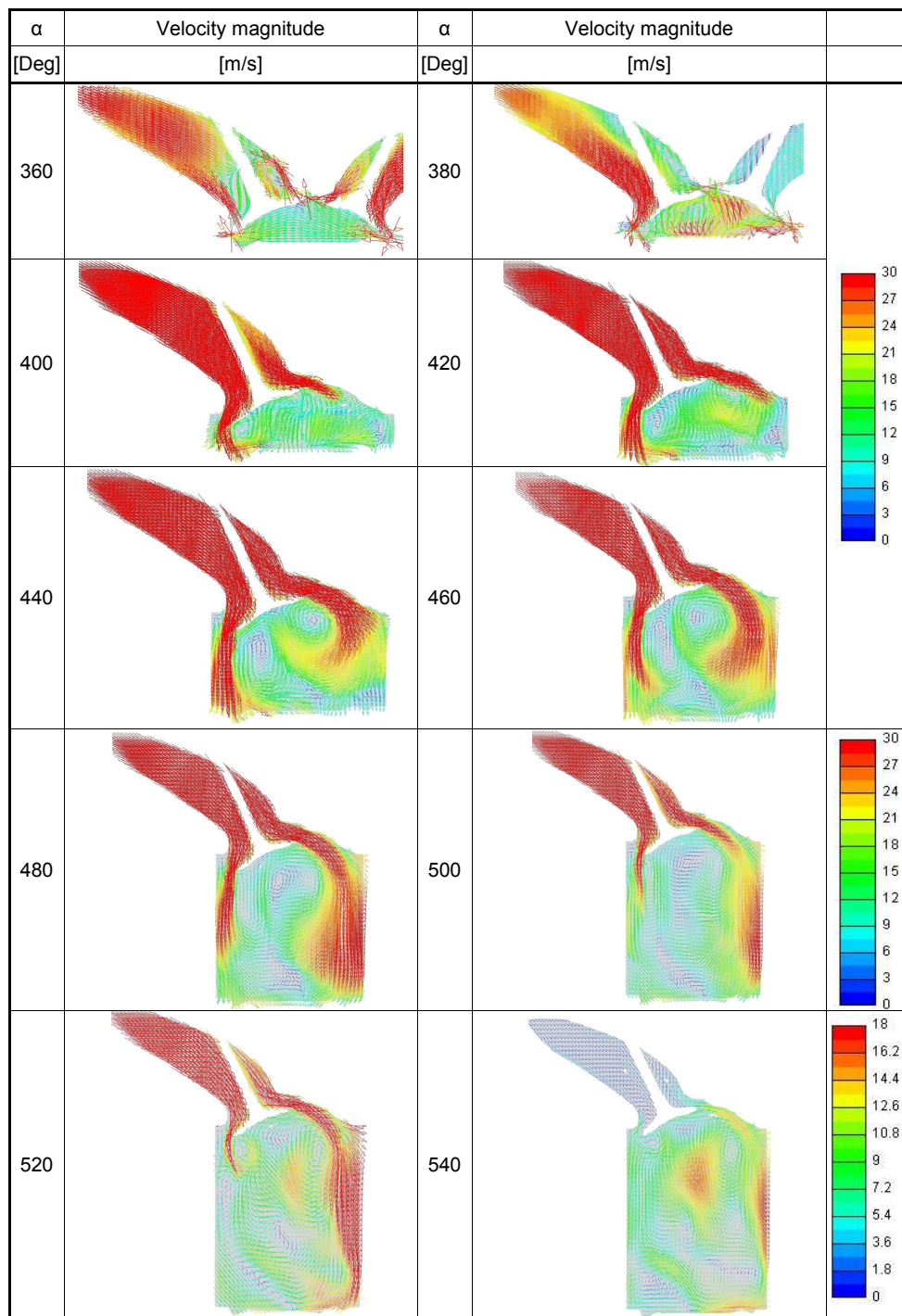
WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

W tabeli 2 zamieszczono rysunki przedstawiające rozkłady prędkości w przekroju modelu. Obejmują one fragment suwu napełniania oraz suw sprężania silnika czyli 300°OWK. GMP w suwie sprężania przyjęto jako 0°OWK. Rysunki pokazują zmiany co 20 °OWK. Dla poprawy czytelności wyniki pokazano przy stałych skalach. Przy czym ich zakresy są następujące:

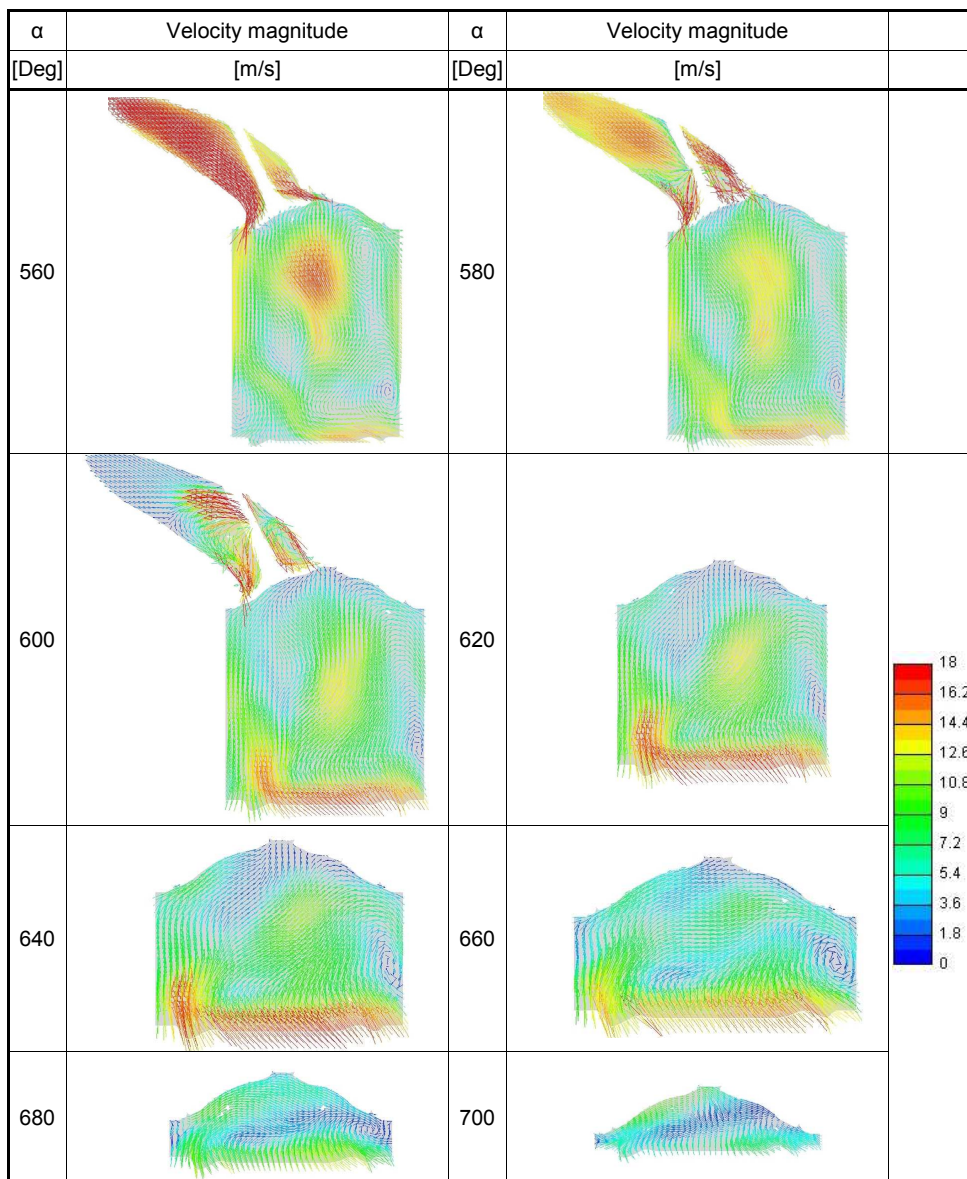
- dla 400 – 500 °OWK 0 – 30 m/s,
- dla 520 – 700 °OWK 0 – 18 m/s.

Na rysunku 6 zamieszczono przebiegi ciśnienia w cylindrze i w kanale dolotowym, natomiast na rysunku 7 przebieg masowego natężenia przepływu przez zawór dolotowy oraz przebieg masy ładunku w cylindrze. Początek napływu powietrza do cylindra rozpoczyna się dla kąta 370 °OWK. Osiąga ono prędkość maksymalną ponad 30 m/s dla kąta 450 °OWK. Dla kąta 360 °OWK widoczny jest przepływ zwrotny powietrza znajdującego się w cylindrze do kanału dolotowego. Wynika on z istnienia nadciśnienia w cylindrze względem układu dolotowego (rys. 6). Nadciśnienie to po-

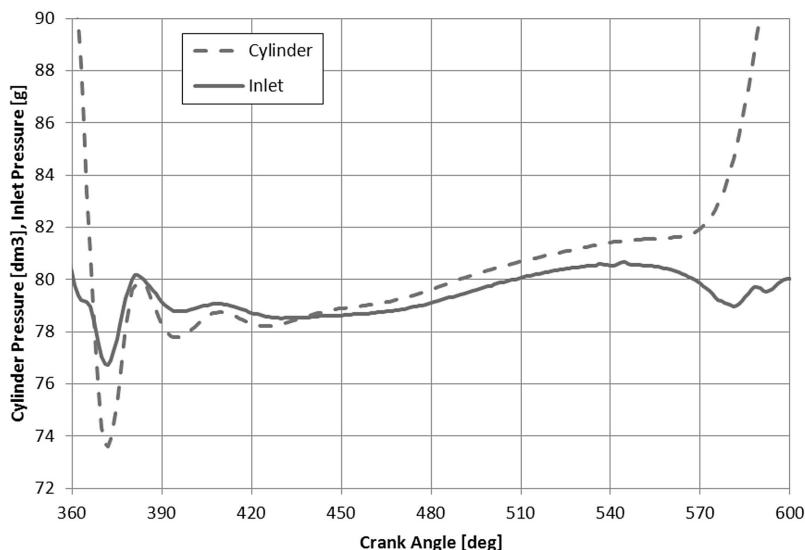
Tabela 2 Rozkłady prędkości przepływu w przekroju modelu



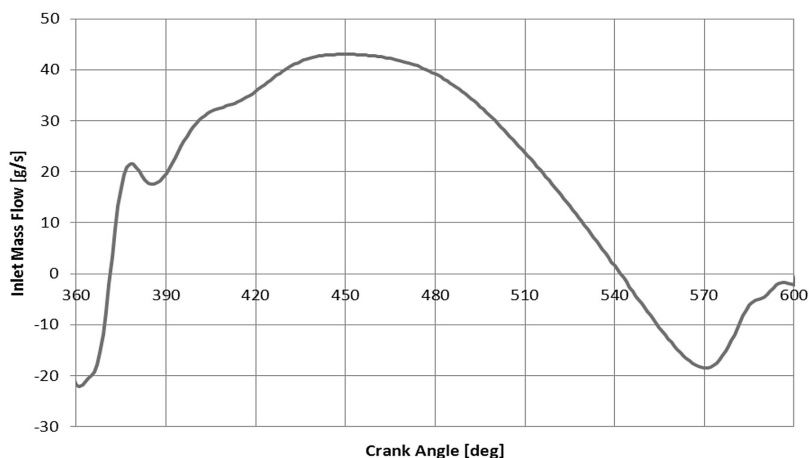
c.d. tabeli 2



wodowane jest przez ruch tłoka w kierunku GMP (trwa koniec suwu wylotu). Zawór wylotowy jest już prawie zamknięty, więc tłok spręża powietrze w cylindrze ponad wartość ciśnienia w kanale dolotowym. Przepływ powietrza do układu dolotowego występuje również po przejściu tłoka przez DMP. Dla kąta 540 °OWK prędkość przepływu zmniejsza się do 0 m/s a następnie zmienia się kierunek przepływu. Jest to spowodowane zmianą kierunku ruchu tłoka. Przepływ zwrotny osiąga maksymalnie ok. 20 m/s dla ok. 450 °OWK. W tym przypadku możemy zaobserwować zjawisko doładowania dynamicznego. W wyniku działania bezwładności powietrza wpływa-



Rys. 6. Przebieg ciśnienia w cylindrze i w kanale dolotowym



Rys. 7. Masowe natężenie przepływu ładunku przez zawór dolotowy

jącego z dużą prędkością z kanału dolotowego do cylindra, ciśnienie w cylindrze zaczyna przewyższać ciśnienie w przewodzie dolotowym. Nawet po przekroczeniu przez tłok DMP i rozpoczęciu suwu sprężania ładunek wpływa do cylindra. Dopiero dla kąta 545 °OWK (5 °OWK po DMP) rozpoczyna się przepływ zwrotny. Kończy się on wraz z zamknięciem zaworu dolotowego.

Po przekroczeniu 370 °OWK rozpoczyna się przepływ czynnika do cylindra. Spowodowane jest to spadkiem wartości ciśnienia w cylindrze poniżej ciśnienia w rurze dolotowej w wyniku ruchu tłoka w kierunku DMP. Prędkość przepływu powietrza stopniowo rośnie i w szczelinie zaworowej osiąga wartość maksymalną (ok. 350 m/s). Powietrze wpływające do cylindra z dużą prędkością rozplywa się po powierzchni cylindra i głowicy. Uderza ono o zawór wylotowy zmieniając kierunek, a także o powierzchnię cylindra i tłoka tworząc zawirowania. W rozpatrywanym przekroju cylindra analizowane są wiry typu tumble (o osi prostopadłej do osi cylindra). Zaobserwowano dwa wiry o przeciwnych zwrotach tworzące się na krawędziach zaworu dolotowego. Rozwijają się one równomiernie do kąta 440 °OWK, po czym zawirowanie występujące po prawej stronie stopniowo zanika, natomiast prawe pozostaje do kąta 540 °OWK. Wir powstały w pobliżu zaworu dolotowego zanika w wyniku wystąpienia przepływu zwrotnego do układu dolotowego (560 °OWK). Po czym po prawej stronie, przy ścianie cylindra powstaje nowy wir, który utrzymuje się do końca procesu sprężania. Istnienie wirów wewnątrz cylindra podczas tworzenia się mieszanki jest bardzo ważne ze względu na odpowiednie wymieszanie par paliwa z powietrzem. Wpływają one również na proces zapłonu (koncentracja paliwa przy świecy) i spalania mieszanki (prędkość rozchodzenia się płomienia).

WNIOSKI

Otrzymane wyniki potwierdzają przydatność i skuteczność zastosowanej metody. Przy niskich kosztach i małej czasochłonności uzyskano informacje odnośnie zjawisk zachodzących w czasie napełniania silnika. Możliwe jest uzyskanie wyników obliczeń z dużą rozdzielczością kątową praktycznie w dowolnym punkcie układu.

Przeprowadzone badania modelowe pozwoliły na obserwacje i analizę zjawisk zachodzących w cylindrze, które mogą mieć znaczący wpływ na proces napełniania oraz proces tworzenia mieszanki oraz proces zapłonu i spalania. Widoczne jest istnienie przepływów zwrotnych przez zawór dolotowy oraz zawirowań ładunku w cylindrze silnika. Zaobserwowano także doładowanie dynamiczne. Dokładniejsze zbadanie wpływu tych zjawisk na pracę silnika wymaga rozbudowania modelu o dodatkowe podmodele oraz wykonania dalszych symulacji.

Proces napełniania wpływa nie tylko na masę powietrza, ma on także duży wpływ na rozkład (depozycję) paliwa w objętości cylindra oraz na rozkład prędkości ładunku. W silnikach z sekwencyjnym wtryskiem paliwa także kąt początku wtrysku ma duży wpływ na ułożenie paliwa w cylindrze [5]. Ważne jest aby w momencie wystąpie-

nia iskry w okolicy świecy zapłonowej znajdowała się mieszanka o odpowiednim składzie [3]. Poznanie tych zjawisk wymaga uzupełnienie modelu silnika o wtrysk paliwa oraz wykonanie dalszych badań modelowych.

LITERATURA

1. Heywood J.B., Internal combustion Engine Fundamentals. McGraw – Hill Book Company New York 1988.
2. Wajand J.A., Wajand J.T., *Tłokowe silniki spalinowe*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
3. Koliński K., Orkisz M., Prociak R., *Wymiana ładunku w czterosurowych silnikach tłokowych*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1991.
4. <http://gmpowertrain.com>
5. Yamato Tadao, Hayashida Masaru, Sekino Hirofumi, Sugahara Koichi, *Effect of Injection Timing on the Performance of a Manifold Injection Gas Engine*, SAE Technical Paper 1999-01-3295, JSAE 9938050.

3D MODELING OF THE SI ENGINE INTAKE PROCESS

Abstract

Hydrogen supply system for SI engines is developed in Lublin University of Technology. To learn the phenomena that occur during the engine filling process, AVL based modeling was performed. This paper describes the results of the modeling studies to show the air flow through engine intake duct and the air movement in the combustion chamber.

Keywords: CFD modeling, intake process.